

一种用于单 CCD 图像传感器的图像插值算法

花 樱 彭宏京

(南京工业大学信息科学与工程学院, 南京 210009)

摘 要 由于物理结构的限制,单 CCD 图像传感器在每个像素位置上只能采集一个颜色分量,其余两个颜色分量只能通过插值的办法得到。提出一种在色差空间进行插值的算法,利用具有比例线性关系的局部颜色特性和局部协方差求得最小均方误差意义下的最优插值系数。所获取的该插值系数具有边缘细节保持性,同时色差空间的插值又考虑了不同颜色分量间的耦合性,因而有效地抑制了图像边缘的模糊和颜色失真。实验结果表明,该算法可获得高质量的插值图像。

关键词 图像传感器 颜色空间 彩色滤波阵列 协方差

中图法分类号:TP391 文献标志码:A 文章编号:1006-8961(2010)04-570-07

An Image Interpolation Algorithm for Single-chip CCD Image Sensors

HUA Ying, PENG Hongjing

(College of Information Science and Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009)

Abstract Due to the physical structure of a single-chip CCD image sensor, there is only a single color component at each pixel position. To recover the full color images, an image interpolation or de-mosaicking is required to reconstruct the other two color components. In this paper, a novel image interpolation algorithm in the color difference space is proposed. By using the ratio linearity property of local color and the local covariance, the optimal MMSE interpolation coefficients are obtained. These coefficients can preserve the edge details of the interpolated images. The interpolation in the color difference space takes into account the correlations between color components, so that the edge blurring and color distortion can be dramatically reduced. Compared with some of the state-of-the-art methods, experiment results demonstrate that the interpolated images using the proposed algorithm are of good quality.

Keywords image sensor, color space, color filter array, covariance

0 引 言

如今数码相机、扫描仪等计算机输入设备日益普及,但出于成本与系统体积的考虑,大部分的数码成像设备(如普及型数码相机、数码录像机等)都采用 1 片 CCD 作为接收图像的传感器。一般是在 CCD 表面覆盖彩色滤波阵列(CFA),仅允许通过

1 种颜色分量,使 CCD 单元只产生 1 个分量的灰度值。为了恢复出另外两个颜色分量,必须使用插值的方法,通常称这种插值为图像插值或者去马赛克处理。目前存在多种彩色滤波阵列模式(CFA patterns)(如图 1 所示)。由于 Bayer pattern^[1](如图 1(a)所示)具有良好的彩色信号敏感特性和彩色恢复特性,因此应用更为普遍。本文的讨论都基于 Bayer pattern。

基金项目:教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-05-0601)

收稿日期:2008-08-29;改回日期:2009-01-12

第一作者简介:花 樱(1982—),女。南京工业大学信息科学与工程学院硕士研究生。主要研究方向为图像处理。E-mail:hyflower

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

(a) Bayer pattern

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

(b) Stripe pattern

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

(c) Mosaic pattern

图 1 几种彩色滤波阵列

Fig. 1 CFA Patterns

常用的图像插值算法有最近邻法、双线性法、双立方法和基于样条的插值法(B-Spline)^[2]等。早期的系统由于硬件条件(存储器容量和处理器的计算速度)的限制,倾向于采用实现简单、运算速度快的算法,因此这些算法得到广泛应用。尽管有上述的优点,但用这些方法插值得到的图像质量并不理想,主要是图像边缘的失真比较明显,包括边缘模糊和锯齿现象。

近年来,很多学者提出了相对复杂的算法,以提高插值图像的质量。由于这些方法都利用了各个颜色分量之间很强的关联性,因而得到的插值图像的质量也有不同程度的提高。文献[3]提出了一种颜色比空间的彩色插值算法。这种方法利用了各个颜色分量的比值几乎保持恒定这一特性,分如下两步进行:首先在颜色比空间进行线性插值,即分别在红色和蓝色像素上得到 R/G 以及 B/G,进而恢复出绿色分量 G,然后再用类似的方法恢复出红色分量 R 和蓝色分量 B。

与上述方法不同,文献[4]的方法是在颜色差空间进行线性插值,即用 R-G 和 B-G 代替 R/G 和 B/G,这种方法比较简单有效,插值图像的质量也得到很好的提高,但该方法利用的是简单的线性插值算子,没有考虑图像的局部变化,因此,所恢复图像的边缘仍然无法达到更好的效果。

文献[5]提出了一种基于局部颜色特性的图像插值方法,文献[6]提出了一种基于局部协方差的图像插值方法,该方法一般多用于高分辨率图像的重建。这两种方法在图像的边缘和非边缘像素采用不同的插值系数,因此,具有保边缘和保细节的特性,可以获得比普通的线性插值更好的效果。本文则把基于局部颜色特性和局部协方差的方法作为插值算子,应用于色差空间的图像插值,以代替色差空间的线性插值算子。实验结果表明,经本文算法插值得到的图像质量得到了较好的提高,尤其是图像边缘的颜色失真得到了很好的抑制。

1 色差空间的双线性插值算法

通常的图像插值算法(双线性插值、双立方插值等)之所以无法得到较好的图像质量。主要有如下两个原因:首先由于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。图 2 是应用 Bayer 彩色滤波阵列而得到的马赛克图像,虚线表示实际图像的边缘, R_5 表示一个像素,由于该像素上只采集到红色分量 R_5 ,因此需要恢复出该像素上的绿色分量 G_5 和蓝色分量 B_5 。如果用双线性插值算法恢复出 B_0 像素的红色分量 R_0 和绿色分量 G_0 ,则分别有

$$R_0 = (R_5 + R_6 + R_7 + R_8) / 4$$

$$G_0 = (G_1 + G_2 + G_3 + G_4) / 4 \quad (1)$$

G	R	G	R_{15}	G	R_{16}	G	R
B	G	B	G_{14}	B'_0	G	B	G
G	R	G_{13}	R_3	G_1	R_8	G	R
B	G	B_{10}	G_2	B_0	G_4	B_{12}	G
G	R	G	R'_0	G_3	R_7	G	R
B	G	B	G	B_{11}	G	B	G
G	R	G	R	G	R	G	R
B	G	B	G	B	G	B	G

图 2 彩色插值示意图

Fig. 2 Schematic diagram of color interpolation

由于 R_5 和 B_0 不在同一个区域,因而在计算 R_0 的时候,把 R_5 包含在内是有问题的。同样,在计算 G_0 的时候也不应该把 G_2 包含在内;导致图像质量不佳的第 2 个原因是由于通常的图像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。据此,文献[7]提出了如下假设:

$$G_n = R_n + K_{R_n}, G_n = B_n + K_{B_n} \quad (2)$$

式中, n 表示像素位置, K_{R_n} 和 K_{B_n} 是该像素上的色差分量,它们在 n 的邻域内变化很小,几乎为常数。根据这一假设,文献[4]提出了一种简单的色差空间的彩色插值法。该算法由如下两步组成:首先在 R 和 B 像素上插值得到绿色分量 G。例如,在图 2 中的 B_0 位置恢复绿色分量,则首先要插值得到色差分量 K_{B_0} 然后用下面的公式计算出

$$G_0 = B_0 + K_{B_0} \quad (3)$$

$$K_{B_0} = (K_{B_1} + K_{B_2} + K_{B_3} + K_{B_4})/4 \quad (4)$$

$$K_{B_i} = G_i - (B_0 + B_{i+8})/2, i = 1, \dots, 4 \quad (5)$$

这样即可得到所有像素上的绿色分量 G , 然后经过进一步插值即得到所有的红色和蓝色分量。例如, 若要在 B_0 像素上恢复出红色分量 R_0 , 则

$$R_0 = G_0 - K_{R_0} \quad (6)$$

其中, $K_{R_0} = (K_{R_1} + K_{R_2} + K_{R_3} + K_{R_4})/4$

$$K_{R_i} = G_i - R_i, i = 1, \dots, 4 \quad (7)$$

这种方法考虑了各个颜色分量之间的关联性, 因此得到的图像质量比一般的插值方法有了很大提高。但该方法在计算色差分量 K_R 和 K_B 的时候, 只是使用了普通的线性算子, 如公式(4)和公式(5)所示。这种算子是一种非自适应的算子, 只是用简单的求均值的方法计算出对应的色差分量。因此在图像的边缘, K_R 和 K_B 的变化要比区域内部显著, 用这种算子就无法准确计算出 K_R 和 K_B , 致使获得的图像边缘不清晰, 无法得到较好的效果。

2 改进的色差空间的图像插值算法

基于局部颜色特性和局部协方差的插值算子可以根据当前像素和相邻像素的空间位置关系, 计算出相应的插值系数来指导插值, 从而克服了上述线性算子带来的缺点, 保证了图像的细节, 抑制了边缘模糊。

2.1 基于局部颜色特性的 1 维插值算子

由于受图像阵列空间分辨率的限制, 所以处于不同区域的边缘像素灰度值变化较大。对于处于不同区域的边缘像素虽然各分量灰度值不同, 但各分量之间存在着线性关系^[8]。根据这一特性, 红、绿、蓝 3 种颜色分量在局部的变化可以表示为

$$\frac{R_3 - R_2}{R_2 - R_1} = \frac{G_3 - G_2}{G_2 - G_1} = \frac{B_3 - B_2}{B_2 - B_1} \quad (8)$$

式中, $R_i, G_i, B_i (i = 1, 2, 3)$ 表示处于不同区域像素的红、绿、蓝分量。

由此, 为了在图 3 中的 G_2 像素位置恢复出红色分量 R_2 , 对式(8)分情况求解则可得:

$$R_2 = F_{1D}(R_1, G_2, R_3) = \begin{cases} (R_3 + TR \cdot R_1)/(1 + TR) & (TR \neq -1) \& (TR \neq Inf) \\ (G_2/G_1) \cdot R_1 & (TR = -1) \& (G_1 \neq 0) \\ R_1 & (TR = -1) \& (G_1 = 0) \\ R_1 & TR = Inf \end{cases} \quad (9)$$

$$\text{式中, } TR = \begin{cases} (G_3 - G_2)/(G_2 - G_1) & G_1 \neq G_2 \\ Inf & G_1 = G_2 \end{cases}$$

$F_{1D}(R_1, G_2, R_3)$ 表示 1 维插值算子, Inf 为无穷大。这种算子在插值时, 首先通过相邻像素的梯度变化率计算出插值系数, 再利用插值系数和 3 个分量之间的线性关系对待插入像素点进行插值。这种插值系数的存在, 使得插值点到边界的变化过渡自然且保持了图像边缘信息, 能够很好地克服图像边缘模糊的现象。

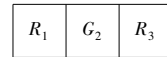


图 3 1 维图像插值模式

Fig. 3 One-dimensional model for image interpolation

2.2 基于协方差的 2 维插值算子

图 4 列出了两种 2 维图像插值模式, 实质上都是通过 P_1, P_2, P_3, P_4 这 4 个像素的灰度值得到 P 像素的灰度值, P 像素的计算方法如下:

$$P = F_{2D}(P_1, P_2, P_3, P_4) = P_1\alpha_1 + P_2\alpha_2 + P_3\alpha_3 + P_4\alpha_4 \quad (10)$$

式中, $F_{2D}(P_1, P_2, P_3, P_4)$ 表示 2 维插值算子。当 $\alpha_i = 1/4 (i = 1, 2, 3, 4)$ 时, 等价于双线性插值, 即第 1 节中用到的线性算子, 这种算子对于图像的边缘和非边缘像素都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。

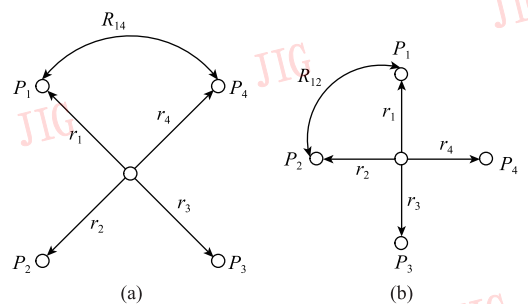


图 4 两种 2 维图像插值模式

Fig. 4 Two-dimensional model for image interpolation

为此, 本文中对于 α 的计算考虑了当前像素和相邻像素的空间位置关系, 在图像的边缘和非边缘像素采用不同的插值系数。假设自然图像是局部平稳高斯过程, 根据经典 Wiener 滤波理论, 可得最优 MMSE (minimum mean square error) 插值系数, $\alpha = R^{-1}r$, 其中 $R = [R_{kl}] (1 \leq k, l \leq 4)$, $r = [r_k] (1 \leq k \leq 4)$ 分别是图像的局部协方差矩阵和协方差向量。

利用几何对偶性,得到 $\mathbf{R} = \frac{1}{M^2} \mathbf{C}^T \mathbf{C}$, $\mathbf{r} = \frac{1}{M^2} \mathbf{C}^T \mathbf{y}$, 即 $\alpha = (\mathbf{C}^T \mathbf{C})^{-1} (\mathbf{C}^T \mathbf{y})$ 。其 $\mathbf{y} = [y_1, \dots, y_k, \dots, y_{M^2}]^T$ 包含了大小为 $M \times M$ 的局部窗口中所有的采样像素, \mathbf{C} 是 $M^2 \times 4$ 矩阵, 它的第 k 行是 y_k 沿着对角线方向的 4 个邻近采样像素 (如图 4(a) 所示):

$\mathbf{c}_k = [P_1 \ P_2 \ P_3 \ P_4]$, 其中 \mathbf{c}_k 代表 \mathbf{C} 的第 k 行。

对于图 4(b), \mathbf{C} 的第 k 行是 y_k 沿着水平、垂直方向的 4 个邻近采样像素。这种插值算子, 分别考虑了 4 个方向上的插值系数, 在图像的边缘, 像素灰度值变化比较大的区域, 能够较好地抑制边缘模糊和颜色失真, 图像的细节得到了良好保持。

2.3 基于局部颜色特性和协方差的插值算法

用第 1 节中的图像插值算法得到的图像质量比一般的传统插值算法有很大提高, 主要表现在, 图像边缘的颜色失真得到了有效抑制。这归功于式(2)假设的有效性, 然而此方法采用的是普通的线性算子, 所以在图像的边缘无法得到更好的效果。而基于局部颜色特性和协方差的插值算子在图像的边缘和非边缘像素采用不同的插值系数, 因此, 具有细节保持和边缘自适应等特性。故本文把这两种算子应用到色差空间的图像插值, 以代替第 1 节中的线性插值算子。具体应用如下:

1) 在 B 像素上插值恢复绿色分量 G

以插值恢复像素 B_0 绿色分量 G (参考图 2) 为例, 此时用图 4(b) 的 2 维插值模式, 其中, P 位置为像素 B_0 , $P_i (i=1, 2, 3, 4)$ 位置为像素 G 。在进行插值时, 需首先计算像素 B_0 的颜色差 $K_B(B_0)$:

$$K_B(B_0) = F_{2D} \{K_B(G_1), K_B(G_2), K_B(G_3), K_B(G_4)\} \quad (11)$$

在计算 $K_B(G_i) (i=1, 2, 3, 4)$ 的时候, 要用到图 3 的 1 维插值模式, 以计算 $K_B(G_2)$ 为例来说明如何插值, 由于

$$K_B(G_2) = G_2 - F_{1D}(B_{10}, G_2, B_0) \quad (12)$$

且所有 $K_B(G_i) (i=1, 2, 3, 4)$ 都可以按这种方法计算, 代入式(11)得出 $K_B(B_0)$, 因此有

$$G_0 = B_0 + K_B(B_0) \quad (13)$$

2) 在像素 B 上插值恢复红色分量 R

以在像素 B_0 上插值恢复红色分量 R (参考图 2) 为例, 此时用图 4(a) 的 2 维插值模式, 其中, P 位置为 B 像素, $P_i (i=1, 2, 3, 4)$ 位置为 R 像素。在进行插值时, 需首先计算像素 B_0 上的颜色差 $K_R(B_0)$:

$$K_R(B_0) = F_{2D} \{K_R(R_5), K_R(R_6), K_R(R_7), K_R(R_8)\} \quad (14)$$

式中, $K_R(R_i) = G_i - R_i (i=5, 6, 7, 8)$, 从而可以得出像素 B_0 上的红色分量为

$$R_0 = G_0 - K_R(B_0) \quad (15)$$

基于上述颜色分量的恢复方法, 对于 Bayer pattern 的马赛克图完整的插值过程归纳如下:

- 1) 由式(11)~(13)对所有 B 像素插值恢复绿色分量 G 。
- 2) 类似步骤 1) 对所有 R 像素插值恢复绿色分量 G 。
- 3) 由式(14)、式(15)对所有 B 像素插值恢复红色分量 R 。
- 4) 类似步骤 3) 对所有 G 像素插值恢复红色分量 R 。
- 5) 类似步骤 3) 对所有 R 像素插值恢复蓝色分量 B 。
- 6) 类似步骤 4) 对所有 G 像素插值恢复蓝色分量 B 。
- 7) 结束。

由于恢复红色分量 R 和蓝色分量 B 时, 要考虑其与绿色分量 G 的相关性, 也就是要计算色差分量 K_R 和 K_B , 所以必须首先恢复绿色分量 G , 然后再恢复另外两种颜色分量。

3 实验结果

为了验证本方法的效果, 用改进的色差空间插值算法与双线性法、颜色比空间的插值算法^[3]及色差空间的双线性插值算法^[4]进行比较实验。通过峰值信噪比 $PSNR$ 和均方误差 MSE 两个指标来评价图像质量。彩色图像的 $PSNR$ 和 MSE 的定义如下:

$$PSNR = 10 \log \left[\frac{255^2 \times M \times N}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (f(i, j) - \hat{f}(i, j))^2} \right] \quad (16)$$

$$MSE = \frac{1}{MN} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N [f(i, j) - \hat{f}(i, j)]^2 \quad (17)$$

其中, $\hat{f}(i, j)$ 为插值图像, $f(i, j)$ 是原始图像, M, N 是图像的尺寸大小。 $PSNR$ 反映了插值图像与原始图像相符合的程度, 而 MSE 则反映了插值图像与原始图像之间的误差, 这个值越小, 说明插值后

得到的图像效果越好。

表 1 给出了几种算法插值后得到的 4 幅图像 R,G,B 3 个分量的 *PSNR* 和 *MSE*。每行中的最佳值,用黑体标出。分析表 1 中数据,可以看出,从 *PSNR* 和 *MSE* 角度,本文算法优于其他算法。图 5 是 parrot, motor, torch, flower 4 幅图用文中几种方法得到的实际效果图和局部放大图。以 flower 为例,通过其局部放大图可以看出,双线性插值算法导致了图像边缘模糊效应和锯齿效应,通过花瓣边缘和旁边一段单独的小树枝可以清楚地看到。产生这种效应的原因是双线性插值算法不考虑待插值像素是否为边缘像素,也未考虑各颜色分量之间的相互影响。图 5(b) 是基于颜色比空间的插值算法,与双线性插值算法相比插值后的图像质量得到了提高,但由于这种算法只考虑了各颜色分量的比值保持恒定这一特性,所以边缘位置仍存

在较为明显的颜色失真。图 5(c) 是利用基于色差空间的双线性插值方法得到的结果,该算法利用了待插值像素上的色差分量在其邻域内几乎为常数的特性,且比基于颜色比空间的插值算法更适用于线性插值,所以插值图像边缘更清晰,质量更高。但由于未考虑图像的局部变化,因此在某些边缘处仍有锯齿状,并且从整体效果来看,一定程度上模糊了边缘和细节部分。图 5(d) 是使用本文方法所获得的插值图像,该方法不仅考虑了不同颜色分量间的耦合性,而且对图像的边缘和非边缘像素自适应的采用不同插值系数,因此与前 3 种方法比较,本文方法没有明显的以上不足,边缘清晰,细节保持良好,保证了较好的视觉效果。表 1 中的客观数据更好地说明了该算法的有效性,如图 flower 中,R 分量的 *PSNR* 和 *MSE* 分别为 85.063 1,47.353 4,比其他算法都有较大提高。

表 1 几种插值算法的性能比较

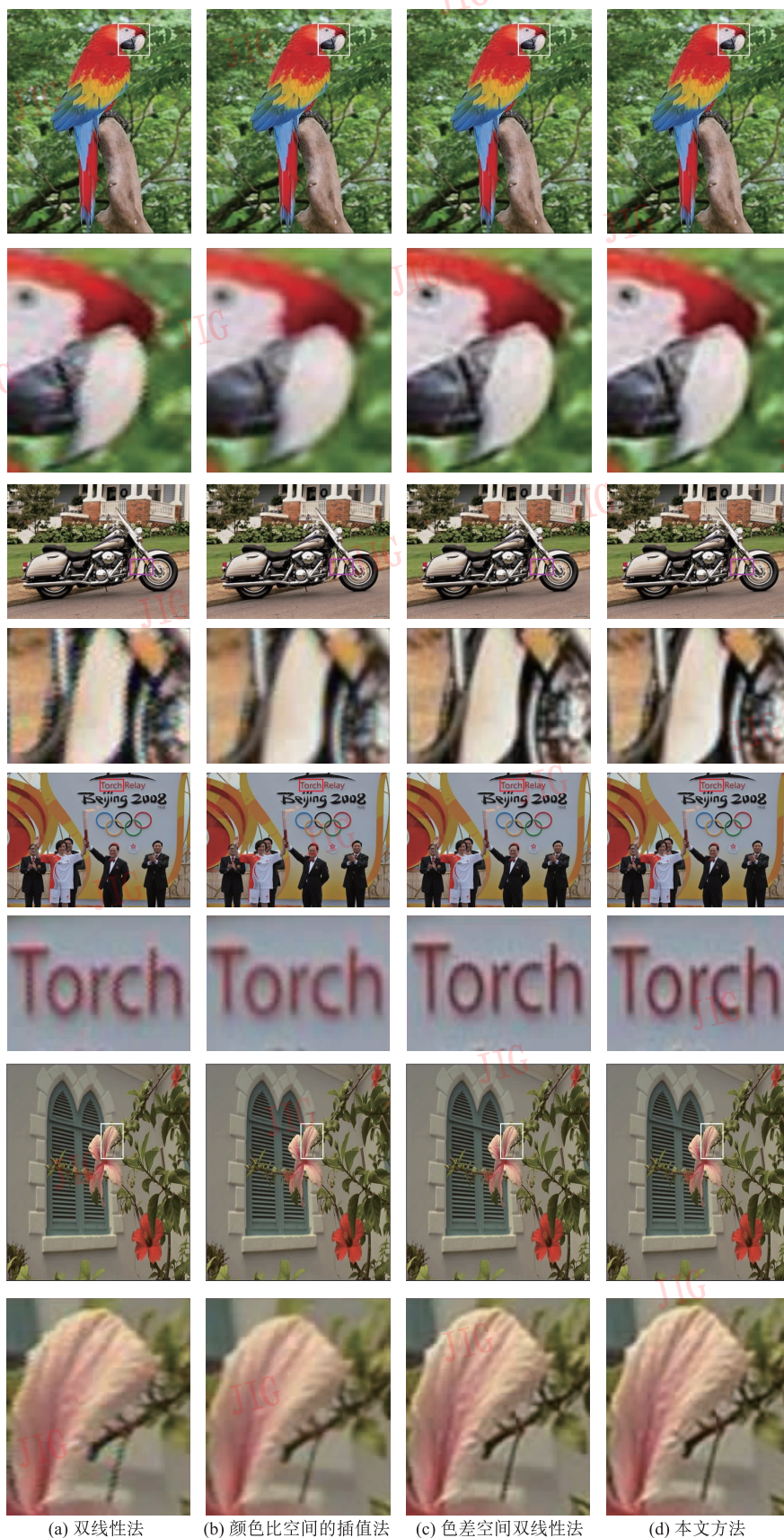
Tab. 1 Performance comparison for various interpolation algorithms

图像	Channel	双线性法		颜色比空间的插值法 ^[3]		色差空间双线性法 ^[4]		本文方法	
		<i>PSNR</i>	<i>MSE</i>	<i>PSNR</i>	<i>MSE</i>	<i>PSNR</i>	<i>MSE</i>	<i>PSNR</i>	<i>MSE</i>
parrot	R	82.583 1	65.647 7	84.855 9	22.140 7	87.068 7	12.985 5	86.987 2	11.252 3
	G	87.107 6	41.132 3	90.072 8	6.660 5	89.821 2	7.738 5	90.166 9	5.177 1
	B	82.220 1	109.708 3	84.521 0	23.915 4	86.392 6	15.821 4	86.900 3	14.190 0
motor	R	77.392 4	511.633 3	79.528 3	295.870 4	82.850 9	121.993 9	83.333 6	103.476 0
	G	81.432 3	201.824 7	84.152 2	170.992 9	86.711 2	67.155 6	87.121 1	57.028 6
	B	77.599 5	487.809 4	79.710 3	275.522 4	83.053 5	118.946 9	83.548 5	97.121 3
Torch	R	79.625 6	44.571 1	80.002 1	40.870 1	84.901 1	16.613 3	84.749 7	15.658 6
	G	83.694 5	17.464 8	84.639 7	14.049 0	86.936 5	8.278 8	87.141 0	6.273 5
	B	79.891 1	17.464 8	80.336 9	37.837 9	84.866 6	17.509 2	85.199 8	16.371 9
flower	R	79.349 1	155.005 5	81.360 6	149.360 6	84.813 5	52.196 2	85.063 1	47.353 4
	G	82.643 0	72.603 4	85.381 1	61.256 4	88.223 1	20.088 6	88.690 4	18.039 4
	B	79.232 2	159.234 8	81.446 6	151.563 3	85.407 5	47.415 6	85.703 7	38.303 4

4 结 论

与其他只考虑颜色耦合性或只考虑图像局部变化的传统方法不一样,本文提出的基于色差空间的图像插值方法同时考虑了不同颜色分量之间

的耦合效应和图像局部变化两方面。借助局部颜色特性和局部协方差获得了更能反映图像局部变化的插值系数,同时又能避免颜色分量之间的相互影响,从而具有保持图像边缘细节的优良特性。用本文方法得到的插值图像边缘清晰,达到了较理想的视觉效果。



(a) 双线性法 (b) 颜色比空间的插值法 (c) 色差空间双线性法 (d) 本文方法

图 5 插值结果及局部放大图

Fig. 5 Results for various interpolation algorithms and local amplification

参考文献 (References)

- [1] Bayer B E. Color imaging Array: U.S. Patent, 3971065 [P]. 1976.
- [2] Jain A K. Fundamentals of Digital Image Processing [M]. Englewood Cliffs, N J, USA: Prentice-Hall, 1989.
- [3] Cok D R. Reconstruction of CCD image using template matching [C]//Proceedings of International Science and Technology (IS&T)'s 47th Annual Conference on Image Science. Rochester N J, USA, 1994: 380-385. <http://citeseer.ist.psu.edu/cache/papers/cs/1097/http://zSzzSzwwww.cs.technion.ac.ilzSz%7EronzSzPAPERSzSzzeccv98.pdf/kimmel99demosaiing.pdf>.
- [4] Pei S C, Tam I K. Effective color interpolation in CCD color filter arrays using signal correlation [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2003, 13(6): 503-513.
- [5] Zheng Yuanjie, Lin Stephen, Yang Jie. Color filter array demosaicking with local color distribution linearity [J]. Optical Engineering, 2005, 44(5): 265-270.
- [6] Xin Li, Michael T. New Edge-directed interpolation [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2001, 10(10): 1521-1527.
- [7] Cheikh F A, Khriji L, Gabbouj M, et al. Color image interpolation using vector rational filters [C]//Proceedings of the SPIE Conference on Nonlinear Image Processing. Bellingham: SPIE, 1998, 3304: 242-249.
- [8] Lin S, Gu J, Yamazaki S, et al. Radiometric calibration from a single image [C]//Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Los Alamitos: IEEE Computer Society, 2004: 938-945.