

DOI: 10.7652/xjtuxb201905018

融合有限差分及梯度的 Bayer-CFA 插值方法

贾晓芬, 郭永存, 赵佰亭, 黄友锐

(安徽理工大学智能矿山技术与装备工程省重点实验室, 232001, 安徽淮南)

摘要: 为了实现对边缘像素点的高精度插值,融合有限差分、图像梯度、图像相关性提出了一种先插值再修正的 Bayer 彩色滤波阵列(color filter array,CFA)插值方法 Bayer-CFA。首先,把 CFA 图像中的已知像素点作为离散的网格节点,利用像素点间的空间相关性构造插值函数。然后,结合色彩相关性设计插值 G 像素的水平、垂直方向的插值算子,并用梯度信息建立两个方向的权重因子,实现 G 平面插值;再根据 G 像素点左右的已知 R 像素点的对称性及色彩相关性构建插值函数,应用色差公式完成 R 平面插值,并用与 R 平面插值相同的方法完成 B 平面插值。最后,对每个插值结果,在以其为中心的 3×3 邻域内进行梯度修正,采用梯度信息构造 8 个方向的权重因子,用像素点的空间位置决定加权系数,以消除不规则边缘及纹理引起的插值误差。仿真结果表明:相较于 EET 算法,Bayer-CFA 的彩色图像峰值信噪比提高了 0.57 dB,S-CIELAB 空间的色差降低了 0.23;Bayer-CFA 在使用梯度修正后能减少伪彩色,沿边缘方向的插值有效削弱了锯齿现象,能保留图像的边缘纹理细节。

关键词: 彩色滤波阵列插值;有限差分;图像梯度;图像相关性

中图分类号: TP399 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2019)05-0132-10

Bayer-Color Filter Array Interpolation Method Combining Finite Difference with Image Gradient

JIA Xiaofen, GUO Yongcun, ZHAO Baiting, HUANG Yourui

(Provincial Key Laboratory of Intelligent Mine Technology and Equipment Engineering,
Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001, China)

Abstract: To achieve high-precision interpolation of edge pixels, a Bayer-color filter array (CFA) interpolation method, including CFA interpolation and correction, is proposed by combining finite difference with image gradient. The known pixels in the CFA image are taken as the discrete mesh nodes, and the interpolation function is constructed by means of the spatial correlation between the pixels. The interpolation operators of the horizontal and vertical directions of interpolation G pixels are designed in combination with the color correlation, and the weighting factors of the two directions are established by the gradient information to realize the G-plane interpolation. Then, the interpolation function is constructed according to the symmetry and color correlation of the known R pixels around the G pixels, and the R-plane interpolation is performed with the color difference formula. The B-plane interpolation is completed by the same

method for the R -plane. Once the interpolation is completed, centered 3×3 neighborhood of each interpolation result is modified. Then the weighting factors of eight directions are constructed by gradient information, and the weighting coefficients are determined by the spatial position of pixels to eliminate the interpolation error caused by irregular edges and textures. Compared with EET method, the color image's peak signal to noise ratio of Bayer-CFA increases by 0.57 dB and the color space difference of S-CIELAB decreases by 0.23. Bayer-CFA reduces the false color by gradient correction, and effectively weakens the sawtooth by interpolating along the edge direction to preserve the image edge details.

Keywords: color filter array interpolation; finite difference; image gradient; image correlation

在当今的数字信息时代,数码相机的使用非常普及,为了缩小体积、降低成本,多数设备中仅有一个传感器并覆盖彩色滤波阵列(color filter array, CFA)。采用此结构的成像设备在每个像素点只能采集到一个颜色(红、绿或者蓝),其余两个颜色需要估计,估计的过程被称为 CFA 插值或去马赛克。针对广泛使用的 CFA 模式^[1],大量致力于消除伪彩色、边缘模糊、锯齿现象的方法^[2-4]相继提出。

彩色图像的邻域像素之间具有较强的空间相关性,各通道间还存在强烈的色彩(光谱)相关性,充分利用图像相关性才能获得高质量的 CFA 插值效果。文献[5-6]提出了基于颜色比的插值方法,文献[7-8]提出了基于颜色差值的插值方法,均考虑了图像相关性。结合了图像相关性的先进技术能进一步提高插值精度,例如:黄丽丽等利用稀疏表示实现了 CFA 插值^[9];Jia 等利用支持向量机获得了高质量的 CFA 插值图像^[10-11]。近年来,各种利用图像梯度信息的方法取得了较好的插值效果^[12-14],例如:Wu 等利用多项式插值实现了 CFA 插值^[4];Jain 等将偏微分方程和有限差分法引入到了图像处理中^[15-16];Yang 等利用有限差分实现图像平稳过渡,从而完成了图像拼接^[17]。

图像梯度的大小和方向体现边缘信息,准确利用梯度不仅可以提高插值精度,还可以保护图像的边缘。将 CFA 图像中的已知像素点作为离散的网格节点,利用像素间的空间相关性设计插值函数,可以实现有限差分对连续像素值的逼近,完成对丢失像素值的估计。研究梯度、有限差分及图像相关性相结合的 CFA 插值方法是有意义的,鉴于此,本文设计了一种融合上述技术的称为 Bayer-CFA 的插值方法。

1 理论基础

有限差分法又称网格法,是最早用计算机进行

数值模拟的方法^[18]。它将连续的定解区域划分为差分网格,利用有限网格节点代替连续的求解区域,利用差商代替微分方程中的偏导数,得到相应的差分方程,再利用插值方法解差分方程,就可以得到原问题在离散点上的近似解。在数字图像处理中,可以通过计算插值函数来逼近连续像素值。将有限差分用于图像 CFA 插值时,可以把已知的像素值作为被称之为网格节点的离散点,再用离散点插值估计出未知的像素值,即可得到图像的连续像素值。

数字图像实质上是二维离散函数,函数的导数就是图像梯度,一般用差分近似表示。图像梯度在图像的每个像素点都是一个具有大小和方向的矢量,含有边缘信息,边缘处的梯度值较大,梯度的方向代表函数变化最快的方向。沿着边缘方向插值能够减少锯齿现象。因此,CFA 插值时利用梯度信息构造插值及修正的权重因子能提高插值精度。

CFA 插值时,充分利用图像的相关性是获得高质量彩色图像的保障。彩色图像除了每个颜色平面上像素间具有空间相关性,各颜色平面之间还具有强烈的色彩相关性,并满足色差恒定定理^[7-8],即在局部区域内的色差值是常数。若 K 为色差值,则 $K^R = I^G - I^R$ 表示 G (绿)平面和 R (红)平面对应像素之间的色差值, $K^B = I^G - I^B$ 表示 G 平面和 B (蓝)平面对应像素之间的色差值, I^R 、 I^G 、 I^B 分别表示 R 、 G 、 B 平面的像素值,插值过程需要充分利用该特性。为有效结合有限差分、梯度及相关性,实现高精度 CFA 插值,本文设计了如图 1 所示的插值流程。

首先结合空间相关性,用插值多项式的插值误差构造插值函数,结合色差理论获取插值算子,利用 5×5 邻域内的梯度构造估计中心像素值的权重因子,完成 G 平面插值。然后用已知 R 像素点的对称性调整插值函数,结合色彩相关性构建 G 和 B 像素点的插值函数,实现 R 平面插值。再用和 R 平面相同的方法实现 B 平面插值。完成插值后,在以插值

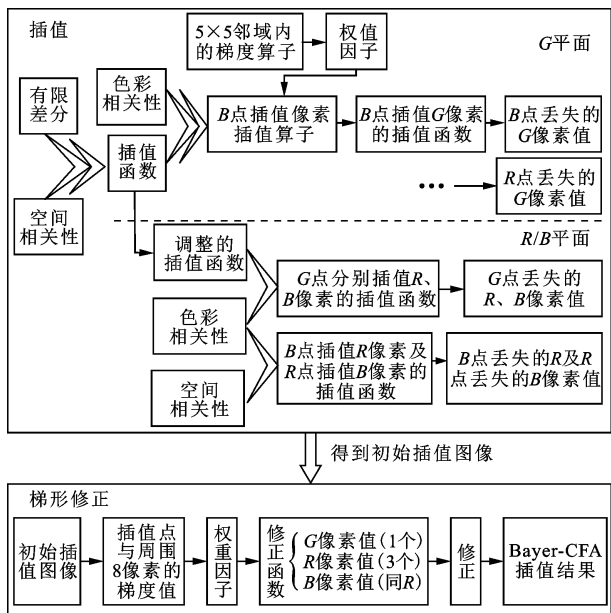


图1 CFA插值流程

点为中心的 3×3 邻域内用梯度信息构造 8 个方向的权重因子,采用空间距离决定权重因子的加权系数实现梯度修正。

2 Bayer-CFA 插值方法

2.1 构造插值函数

设函数 $f(x) \in [a, b]$, $n+1$ 阶连续可微,若有 $n+1$ 个插值节点 $\{x_i\}_{i=0}^{n+1} \subset [a, b]$, 则插值多项式 $P_n(x)$ 的插值误差 $R_n(x)$ 为

$$R_n(x) = P_n(x) - f(x) = \frac{f^{(n+1)}(\xi)}{(n+1)!} \prod_{i=0}^n (x - x_i) \quad (1)$$

式中 $\min\{x_i\} \leq \xi \leq \max\{x_i\}$ 。

若只有 $x_0, x_0 + h$ 两个插值节点,且是等间距点,其中 $h = (a+b)/2$, 则插值误差(截断误差)有界,为 $R_1(x) = \frac{f^{(2)}(\xi)}{2!} \prod_{i=0}^1 (x - x_i)$, 此时可得

$$f(x) \approx f(x_0) + f'(x_0)(x - x_0) + R_1(x) \quad (2)$$

由有限差分方程可得

$$\left. \begin{aligned} f'(x_0) &\approx \frac{f(x_0 + h) - f(x_0)}{h} \\ f^{(2)}(\xi) &\approx \frac{f'(\xi + h) - f'(\xi)}{h} \approx \frac{f(\xi + 2h) - f(\xi + h) - [f(\xi + h) - f(\xi)]}{h^2} = \\ &\frac{f(\xi + 2h) - 2f(\xi + h) + f(\xi)}{h^2} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

取 $x = x_0 + h/2$, 将式(3)代入式(2)可得

$$f\left(x_0 + \frac{h}{2}\right) \approx \frac{f(x_0 + h) + f(x_0)}{2} - \frac{f(\xi + 2h) - 2f(\xi + h) + f(\xi)}{8} = M + N \quad (4)$$

CFA 图像中的像素间隔为整数倍像素,为了将式(4)作为 CFA 图像的插值函数, h 的取值必须是偶数。图像像素之间的距离越近,则空间相关性越强,反之则越弱。为了保证插值函数充分利用图像的空间相关性,取 $h = 2$ 。此时, M 项由 2 个依次相距 2 像素的点构成, N 项由 3 个依次相距 2 像素的点构成。

2.2 插值 G 平面

为了便于说明,用 $I_{i,j}^R, I_{i,j}^G, I_{i,j}^B$ 分别表示待插值点 (i, j) 的红色、绿色、蓝色像素值, $\hat{I}_{i,j}^R, \hat{I}_{i,j}^G, \hat{I}_{i,j}^B$ 分别表示其估计值;用 $K_{i,j}$ 表示点 (i, j) 的色差值,用 $\hat{K}_{i,j}$ 表示其估计值,上标 R 和 B 分别代表为 G 像素与 R 像素或 G 像素与 B 像素的色差。

根据色差理论可得 B 点插值 G 像素的水平方向插值算子 $\hat{I}_{i,j}^{G,H}$ 为

$$\hat{I}_{i,j}^{G,H} = I_{i,j}^B + K_{i,j}^B \approx I_{i,j}^B + 0.5(K_{i,j-1}^B + K_{i,j+1}^B) = I_{i,j}^B + 0.5[(I_{i,j-1}^G - \hat{I}_{i,j-1}^B) + (I_{i,j+1}^G - \hat{I}_{i,j+1}^B)] \quad (5)$$

式中 $\hat{I}_{i,j-1}^B$ 和 $\hat{I}_{i,j+1}^B$ 未知,可利用式(4)获得,其中的 M 项取待插值点左右相邻的 2 点, N 项取待插值点及左右距离 2 个像素的 2 点,表达式为

$$\hat{I}_{i,j-1}^B = 0.5(I_{i,j-2}^B + I_{i,j}^B) - 0.125(I_{i,j-3}^G - 2I_{i,j-1}^G + I_{i,j+1}^G) \quad (6)$$

$$\hat{I}_{i,j+1}^B = 0.5(I_{i,j}^B + I_{i,j+2}^B) - 0.125(I_{i,j-1}^G - 2I_{i,j+1}^G + I_{i,j+3}^G) \quad (7)$$

将式(6)(7)代入式(5)可得

$$\hat{I}_{i,j}^{G,H} = 0.25(2I_{i,j}^B - I_{i,j-2}^B - I_{i,j+2}^B) + 0.0625(I_{i,j-3}^G + 7I_{i,j-1}^G + 7I_{i,j+1}^G + I_{i,j+3}^G) \quad (8)$$

同理可得垂直方向的插值算子 $\hat{I}_{i,j}^{G,V}$ 为

$$\hat{I}_{i,j}^{G,V} = I_{i,j}^B + 0.5[(I_{i-1,j}^G - \hat{I}_{i-1,j}^B) + (I_{i+1,j}^G - \hat{I}_{i+1,j}^B)] = 0.25(2I_{i,j}^B - I_{i-2,j}^B - I_{i+2,j}^B) + 0.0625(I_{i-3,j}^G + 7I_{i-1,j}^G + 7I_{i+1,j}^G + I_{i+3,j}^G) \quad (9)$$

图像的梯度包含边缘信息,利用梯度信息实现插值有助于提高插值精度。为了获得准确的梯度信息,在 5×5 邻域内用待插值点的多个已知相邻像素点计算梯度,利用梯度信息构造梯度算子,公式为

$$\begin{aligned} \nabla^H = & |I_{i,j-1}^G - I_{i,j+1}^G| + |I_{i+1,j-2}^G - I_{i+1,j}^G| + \\ & |I_{i+1,j}^G - I_{i+1,j+2}^G| + |I_{i-1,j-2}^G - I_{i-1,j}^G| + \\ & |I_{i-1,j}^G - I_{i-1,j+2}^G| + |I_{i,j-2}^B - I_{i,j}^B| + \\ & |I_{i,j}^B - I_{i,j+2}^B| + \varepsilon_1 \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \nabla^V = & |I_{i-1,j}^G - I_{i+1,j}^G| + |I_{i-2,j-1}^G - I_{i,j+1}^G| + \\ & |I_{i,j-1}^G - I_{i+2,j-1}^G| + |I_{i-2,j+1}^G - I_{i,j+1}^G| + \\ & |I_{i,j+1}^G - I_{i+2,j+1}^G| + |I_{i-2,j}^B - I_{i,j}^B| + \\ & |I_{i,j}^B - I_{i+2,j}^B| + \varepsilon_1 \end{aligned} \quad (11)$$

式中: ∇ 表示梯度算子, 上标 H 和 V 分别表示水平和垂直方向; ε_1 是趋向于无穷小的正数。

由式(10)(11)得到权重因子 $\omega^H = 1/\nabla^H$ 、 $\omega^V = 1/\nabla^V$, 最终获得 B 点的 G 像素估计值为

$$\hat{I}_{i,j}^G = (\hat{I}_{i,j}^{G,H} \omega^H + \hat{I}_{i,j}^{G,V} \omega^V) (\omega^H + \omega^V)^{-1} \quad (12)$$

在 R 点插值 G 像素的方法同上, 只需将式(5)~(11)中的 B 换成 R 即可。

G 平面插值完成后, 平面上的所有像素点均为已知。下面利用色差值和 G 平面上所有的已知像素值插值估计其余两个平面。

2.3 插值 R 平面

在 Bayer 型 CFA 图像中, G 像素点有两种位置: (1) 只有 G 和 R 像素点的行, 后文记为 GR 行; (2) 只有 G 和 B 像素点的行, 后文记为 GB 行。

2.3.1 G 平面插值 R 像素 GR 行的 G 点左右均为已知的 R 像素点, 因此在 G 点的水平方向估算 G 点的色差, 公式为

$$\begin{aligned} \hat{K}_{i,j}^R = & 0.5(K_{i,j-1}^R + K_{i,j+1}^R) - \\ & 0.125[0.5(K_{i,j-1}^R - 2K_{i,j+1}^R + K_{i,j+3}^R) + \\ & 0.5(K_{i,j-3}^R - 2K_{i,j-1}^R + K_{i,j+1}^R)] = \\ & 0.0625(9K_{i,j-1}^R + 9K_{i,j+1}^R - K_{i,j+3}^R - K_{i,j-3}^R) = \\ & 0.0625[9(\hat{I}_{i,j-1}^G - I_{i,j-1}^R) + 9(\hat{I}_{i,j+1}^G - I_{i,j+1}^R)] - \\ & 0.0625[(\hat{I}_{i,j+3}^G - I_{i,j+3}^R) + (\hat{I}_{i,j-3}^G - I_{i,j-3}^R)] \end{aligned} \quad (13)$$

式中第一项对应式(4)的 M 项, 第二项对应式(4)的 N 项。M 项由 G 点左右相邻的 2 个 R 点的色差值构成。N 项由 3 个依次相距 2 像素的 R 点的色差值构成。

同理, GB 行的 G 点上下均为已知的 R 像素点, 在 G 点的垂直方向估算 G 点的色差值, 公式为

$$\begin{aligned} \hat{K}_{i,j}^R = & 0.0625(9K_{i-1,j}^R + 9K_{i+1,j}^R - K_{i+3,j}^R - K_{i-3,j}^R) = \\ & 0.0625[9(\hat{I}_{i-1,j}^G - I_{i-1,j}^R) + 9(\hat{I}_{i+1,j}^G - I_{i+1,j}^R)] - \\ & 0.0625[(\hat{I}_{i+3,j}^G - I_{i+3,j}^R) + (\hat{I}_{i-3,j}^G - I_{i-3,j}^R)] \end{aligned} \quad (14)$$

将式(13)(14)分别代入 $\hat{I}_{i,j}^R = I_{i,j}^G - \hat{K}_{i,j}^R$, 即可分别得到 GR 行和 GB 行的 G 点的 R 像素值。此时, R 平面上只有 B 点的 R 像素值未知。

2.3.2 B 平面插值 R 像素 图 2 是 B 平面插值 R 像素的 3×3 邻域, 以中心点“ $\hat{G}, B$ ”为例, $\hat{G}$ 表示该点的 G 像素为估计值, B 表示该点的 B 像素为已知

值, 该点为 B 像素点, 其他点的含义以此类推。插值出 B 像素点的 R 像素估计值, 即可获得完整的 R 平面。

	$j-1$	j	$j+1$
$i-1$	$\hat{G}, R$	$G, \hat{R}$	$\hat{G}, R$
i	$G, \hat{R}$	$\hat{G}, B$	$G, \hat{R}$
$i+1$	$\hat{G}, R$	$G, \hat{R}$	$\hat{G}, R$

图 2 B 平面插值 R 像素的 3×3 邻域

图 2 中心点 B 的对角四邻域均为 R 像素点, 其 G 像素值在插值 G 平面时已经获得, R 点对应的 G 和 R 两平面之间的色差值为 $K^R = \hat{I}^G - I^R$ 。同理, 图 2 中心点 B 的水平垂直四邻域均为 G 像素点, 其 R 像素值在第 2.3.1 节已经获得, 在估计 R 像素值时使用了 G 像素估计值, 该点色差值 $K^R = I^G - \hat{I}^R$ 相对较大。故而, 取 B 点的色差值为其对角四邻域的色差平均值, 计算公式为

$$\hat{K}_{i,j}^R = 0.25(K_{i-1,j-1}^R + K_{i-1,j+1}^R + K_{i+1,j-1}^R + K_{i+1,j+1}^R) \quad (15)$$

将式(15)代入 $\hat{I}_{i,j}^R = \hat{I}_{i,j}^G - \hat{K}_{i,j}^R$, 即可得到 B 点的 R 像素值, 完成 R 平面插值。

2.4 插值 B 平面

插值 B 平面与插值 R 平面的方法类似。G 平面插值 B 像素值时, GR 行和 GB 行的色差值 $\hat{K}^B$ 分别在垂直、水平方向进行估计。R 平面插值 B 像素值时, 在以 R 点为中心的图 3 所示的 3×3 邻域内估计。最后采用 $\hat{I}_{i,j}^B = \hat{I}_{i,j}^G - \hat{K}_{i,j}^B$ 计算出 G 点的 B 像素值, 得到完整的 B 平面。

	$j-1$	j	$j+1$
$i-1$	$\hat{G}, B$	$G, \hat{R}$	$\hat{G}, B$
i	$G, \hat{R}$	$\hat{G}, R$	$G, \hat{R}$
$i+1$	$\hat{G}, B$	$G, \hat{R}$	$\hat{G}, B$

图 3 R 平面插值 B 像素的 3×3 邻域

3 梯度修正插值精度

不规则边缘及纹理的存在, 会使邻域内的像素值发生突变, 导致空间相关性减小, 引起插值误差。为了有效减小插值误差, 根据不同插值方向的相邻像素间的空间相关性的差异来分配不同的插值权重, 用来修正插值结果, 从而达到提高插值精度的目的。

3.1 修正邻域

插值完成后,每个颜色的插值结果均在 3×3 邻域内进行修正。图4是插值出的像素点的空间位置,中心点上下左右的四个点同时是“/”前或后的点。图4a中 $\hat{G}$ 点是插值出的 G 像素空间位置,对角四邻域为 R 点时, $\hat{G}$ 点像素值是 B 点的 G 像素估计值,对角四邻域为 B 点时, $\hat{G}$ 点像素值是 R 点的 G 像素估计值。图4b中 $\hat{R}$ 点是 B 点插值出的 R 像素空间位置。图4c中 $\hat{R}$ 点是插值出的 R 像素空间位置。当左右为 B 点、上下为 R 点时, $\hat{R}$ 点像素值是 GB 行的 G 点的 R 像素估计值;当左右为 R 点、上下为 B 点时, $\hat{R}$ 点像素值是 GR 行的 G 点的 R 像素估计值。将图4b和4c中的 R 点和 B 点互换,即可得到插值出的 B 像素空间位置。

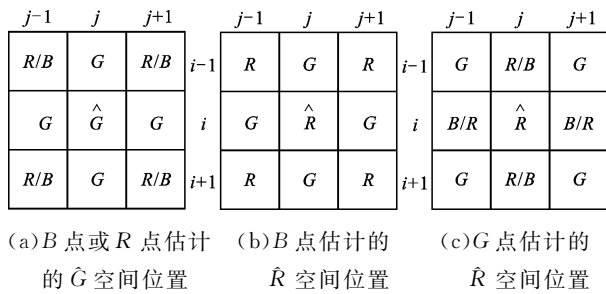


图4 插值点的空间位置

3.2 修正过程

在 3×3 邻域内对插值结果进行修正的过程分为三步,具体步骤如下。

第一步,计算中心像素点与其8邻域的像素差值,即中心点在8个方向的梯度值,公式为

$$\begin{aligned} \nabla_1 &= |X_{i,j} - X_{i,j+1}|; & \nabla_2 &= |X_{i,j} - X_{i,j-1}|; \\ \nabla_3 &= |X_{i,j} - X_{i+1,j}|; & \nabla_4 &= |X_{i,j} - X_{i-1,j}|; \\ \nabla_5 &= |X_{i,j} - X_{i-1,j-1}|; & \nabla_6 &= |X_{i,j} - X_{i-1,j+1}|; \\ \nabla_7 &= |X_{i,j} - X_{i+1,j-1}|; & \nabla_8 &= |X_{i,j} - X_{i+1,j+1}| \end{aligned} \quad (16)$$

式中 $X=R, G, B$ 。

第二步,计算权重因子,公式为

$$\omega_m = 1/\nabla_m, \quad m = 1, 2, \dots, 8 \quad (17)$$

第三步,修正插值点像素值, $\tilde{I}_{i,j}^R$ 、 $\tilde{I}_{i,j}^G$ 、 $\tilde{I}_{i,j}^B$ 表示修正值,得到最终的插值结果。

3.3 修正结果

G 像素值:如图4a所示,水平垂直四邻域均为已知 G 像素值,对角四邻域均为估计出的 G 像素值,为了提高修正精度,采用欧式距离决定加权系数,修正结果为

$$\begin{aligned} \tilde{I}_{i,j}^G &= k_1 \hat{I}_{i,j}^G + k_2 \left[\frac{\omega_1 I_{i,j+1}^G + \omega_2 I_{i,j-1}^G + \omega_3 I_{i+1,j}^G + \omega_4 I_{i-1,j}^G}{\sum_{m=1}^4 \omega_m + \sum_{m=5}^8 \omega_m / \sqrt{2}} + \right. \\ &\quad \left. \frac{\omega_5 I_{i-1,j}^G + (\omega_3 \hat{I}_{i-1,j-1}^G + \omega_6 \hat{I}_{i-1,j+1}^G) / \sqrt{2}}{\sum_{m=1}^4 \omega_m + \sum_{m=5}^8 \omega_m / \sqrt{2}} + \right. \\ &\quad \left. \frac{(\omega_7 \hat{I}_{i+1,j-1}^G + \omega_8 \hat{I}_{i+1,j+1}^G) / \sqrt{2}}{\sum_{m=1}^4 \omega_m + \sum_{m=5}^8 \omega_m / \sqrt{2}} \right] \end{aligned} \quad (18)$$

式中 k_1 和 k_2 分别是第2.2节获得的 G 像素估计值及本节修正项的权重,满足 $k_1 + k_2 = 1$, 且 $k_1 > 0.5$, $k_2 < 0.5$ 。

R 像素值:如图4b所示,对角四邻域均为已知的 R 像素值,为充分利用已知像素值及邻域像素间的空间相关性提高修正精度,采用棋盘距离决定加权系数,修正结果为

$$\begin{aligned} \tilde{I}_{i,j}^R &= v_1 \hat{I}_{i,j}^R + v_2 \left[\frac{\omega_1 \hat{I}_{i,j+1}^R + \omega_2 \hat{I}_{i,j-1}^R + \omega_3 \hat{I}_{i+1,j}^R + \omega_4 \hat{I}_{i-1,j}^R}{\sum_{m=1}^8 \omega_m} + \right. \\ &\quad \left. \frac{\omega_5 \hat{I}_{i-1,j-1}^R + \omega_6 \hat{I}_{i-1,j+1}^R + \omega_7 \hat{I}_{i+1,j-1}^R + \omega_8 \hat{I}_{i+1,j+1}^R}{\sum_{m=1}^8 \omega_m} \right] \end{aligned} \quad (19)$$

式中 v_1 和 v_2 分别是2.3节获得的 R 像素估计值及本节修正项的权重,满足 $v_1 + v_2 = 1$, 且 $v_1 > 0.5$, $v_2 < 0.5$ 。

R 像素值:如图4c所示, GB 行的 G 点上下是已知的 R 像素值, GR 行的 G 点左右是已知的 R 像素值,其余6个像素点的 R 像素值均为估计值,增大2个已知 R 像素值的权重, GR 行的 G 点的 R 像素值为

$$\begin{aligned} \tilde{I}_{i,j}^R &= v_1 \hat{I}_{i,j}^R + v_2 \left[\frac{\sqrt{2}(\omega_1 \hat{I}_{i,j+1}^R + \omega_2 \hat{I}_{i,j-1}^R) + \omega_3 \hat{I}_{i+1,j}^R + \omega_4 \hat{I}_{i-1,j}^R}{\sum_{m=1}^2 \sqrt{2} \omega_m + \sum_{m=3}^8 \omega_m} + \right. \\ &\quad \left. \frac{\omega_5 \hat{I}_{i-1,j-1}^R + \omega_6 \hat{I}_{i-1,j+1}^R + \omega_7 \hat{I}_{i+1,j-1}^R + \omega_8 \hat{I}_{i+1,j+1}^R}{\sum_{m=1}^2 \sqrt{2} \omega_m + \sum_{m=3}^8 \omega_m} \right] \end{aligned} \quad (20)$$

GB 行的 G 点的 R 像素值为

$$\begin{aligned} \tilde{I}_{i,j}^R &= v_1 \hat{I}_{i,j}^R + v_2 \left[\frac{\omega_1 \hat{I}_{i,j+1}^R + \omega_2 \hat{I}_{i,j-1}^R + \sqrt{2}(\omega_3 \hat{I}_{i+1,j}^R + \omega_4 \hat{I}_{i-1,j}^R)}{\sum_{m=1}^2 \omega_m + \sum_{m=3}^4 \sqrt{2} \omega_m + \sum_{m=5}^8 \omega_m} + \right. \\ &\quad \left. \frac{\omega_5 \hat{I}_{i-1,j-1}^R + \omega_6 \hat{I}_{i-1,j+1}^R + \omega_7 \hat{I}_{i+1,j-1}^R + \omega_8 \hat{I}_{i+1,j+1}^R}{\sum_{m=1}^2 \omega_m + \sum_{m=3}^4 \sqrt{2} \omega_m + \sum_{m=5}^8 \omega_m} \right] \end{aligned} \quad (21)$$

B 像素值的修正方法和 R 像素值的类似,不再赘述。按照上述方法,首先在第 2 节得到各像素点的估计值,再用第 3 节得到的修正值去替代,即可得到最终的彩色图像,完成 CFA 插值。

4 仿真实验

采用 Matlab R2016a 编程,在 3.60 GHz 的 Intel(R) Core(TM) i7-7700 CPU、16.0 GB 内存的台式机上运行本文程序。采用 24 幅分辨率为 768×512 的标准柯达彩色图像,先下采样成 Bayer 型 CFA 图像,然后完成 CFA 插值。

4.1 可行性验证

为了验证 Bayer-CFA 方法的有效性,分别进行以下两个实验。

(1)验证梯度修正对插值精度的影响。

表 1 24 幅图像不同方法的 r_{CPSNR} 和 ΔE_{ab}^*

图像 编号	$r_{\text{CPSNR}}/\text{dB}$								ΔE_{ab}^*							
	文献 [3]	文献 [4]	文献 [7]	文献 [9]	文献 [10]	文献 [12]	无梯度 修正	Bayer- CFA	文献 [3]	文献 [4]	文献 [7]	文献 [9]	文献 [10]	文献 [12]	无梯度 修正	Bayer- CFA
1	34.14	34.28	33.81	34.22	33.77	34.15	34.12	34.57	2.21	2.18	3.11	2.29	2.93	2.05	2.36	2.01
2	38.47	40.78	38.88	38.95	38.90	38.78	38.83	39.37	1.80	1.25	1.73	1.67	1.71	1.89	1.84	1.43
3	41.04	40.16	40.87	40.98	41.07	41.12	41.05	41.50	1.01	1.33	1.19	1.07	0.98	1.05	1.00	0.89
4	39.26	42.01	39.43	39.37	39.56	39.35	39.59	40.21	1.37	0.98	1.68	1.92	1.63	1.67	1.56	1.28
5	35.17	35.23	35.29	35.95	35.33	35.66	35.32	35.97	2.52	2.72	2.64	2.44	2.58	2.33	2.62	2.13
6	34.99	32.35	34.95	35.84	35.17	35.47	35.29	35.86	1.62	3.14	2.41	1.15	2.10	1.64	1.87	1.10
7	40.80	40.62	40.54	41.07	40.62	40.90	40.63	41.11	1.14	1.30	1.40	1.01	1.26	1.05	1.25	0.96
8	31.97	33.76	30.52	32.52	31.03	31.29	30.87	31.40	2.40	1.15	4.03	1.33	3.87	2.99	3.92	2.21
9	40.12	36.69	39.55	39.89	39.47	39.62	39.76	40.35	0.94	2.96	1.48	1.29	1.52	1.46	0.98	0.79
10	40.49	39.55	40.30	40.46	40.47	40.35	40.56	41.22	0.93	1.67	1.41	1.22	1.23	1.27	1.14	0.88
11	36.53	32.25	36.24	36.73	36.50	36.55	36.47	36.72	1.85	2.93	2.16	2.01	2.11	2.04	2.12	1.74
12	39.89	40.77	40.02	40.26	40.12	40.31	40.19	40.58	0.82	0.60	1.36	1.09	1.38	1.03	1.21	0.69
13	31.39	28.24	31.33	31.68	31.41	31.54	31.48	31.89	3.16	5.22	4.01	2.45	3.57	3.16	3.34	2.31
14	35.52	34.71	35.43	35.84	35.65	35.71	35.69	36.17	1.96	2.74	2.38	1.77	2.19	1.95	2.16	1.63
15	38.43	34.40	38.94	38.13	38.76	38.22	38.73	39.31	1.57	3.56	1.57	1.70	1.51	1.67	1.54	1.42
16	38.34	38.01	37.91	39.40	38.13	38.26	38.17	38.61	1.32	1.71	1.84	0.56	1.65	1.42	1.44	1.23
17	39.12	37.25	39.26	39.82	39.27	39.54	39.26	39.95	1.54	3.11	1.54	1.42	1.49	1.45	1.62	1.30
18	35.22	41.07	35.79	35.55	35.59	35.43	34.94	35.62	2.43	0.77	2.39	2.46	2.40	2.50	2.65	2.09
19	36.54	42.91	35.29	36.66	36.02	36.59	35.47	36.73	1.56	0.58	2.29	1.25	2.01	1.43	2.16	1.14
20	38.95	35.99	38.70	37.91	38.29	37.67	38.85	39.46	1.12	2.79	1.54	1.84	1.47	1.86	1.22	1.02
21	35.92	33.62	35.72	35.96	35.80	35.88	35.87	36.49	1.62	3.22	2.26	1.99	2.27	2.19	2.26	1.49
22	36.85	34.78	36.45	36.82	36.67	36.80	36.60	37.14	1.55	2.97	2.17	1.87	1.92	1.95	1.97	1.36
23	40.95	34.05	41.68	42.37	41.72	42.52	41.91	42.51	1.02	4.71	1.22	1.02	1.18	0.85	1.14	0.88
24	33.69	21.06	33.76	33.93	33.70	33.82	33.94	34.75	1.67	5.36	2.36	2.04	2.25	2.02	1.76	1.54
平均 值	37.24	36.02	37.11	37.51	37.21	37.31	37.23	37.81	1.63	2.46	2.09	1.62	1.97	1.79	1.88	1.40

利用客观指标作为目标函数, k_1 在区间 $[0.5, 0.95]$ 以 0.05 的步长递增,同时 k_2 在区间 $[0.5, 0.05]$ 以 0.05 的步长递减,研究梯度修正时式(18)中涉及的权重系数,最终确定 $k_1=0.7, k_2=0.3$ 。确定式(19)~(21)中涉及的权重系数 v_1 和 v_2 的方法与式(18)相同,最终得到 $v_1=0.9, v_2=0.1$ 。

(2)验证 Bayer-CFA 方法的插值效果。

采用文献[3](EET)、文献[4](SSA)、文献[7]、文献[9]、文献[10]、文献[12]、无梯度修正的 Bayer-CFA 方法、Bayer-CFA 方法进行 CFA 插值,并利用视觉效果以及彩色图像峰值信噪比 $r_{\text{CPSNR}}^{[11]}$ 和 S-CIELAB 空间的色差 $\Delta E_{\text{ab}}^{*[8,11]}$ 两项客观指标来衡量插值效果。

4.2 实验结果分析

表 1 是各种方法的客观指标值,图像编号 1~

24 分别代表图像 Kodim1、Kodim2、……、Kodim24，加粗数值表示最优结果，可以看出：文献[9]对 Kodim16 获得了最大 r_{CPSNR} 和最小 ΔE_{ab}^* ，表明其结果图像与原始标准图像在矢量模上的误差最小，且点对点的失真最小，获得了最好的 CFA 插值效果；文献[12]对 Kodim23 获得了最大 r_{CPSNR} 和最小 ΔE_{ab}^* ；对 Kodim2，Kodim4，Kodim8，Kodim12，Kodim18，Kodim19 这 6 幅图像，文献[4]均获得了最好的客观指标，但性能很不稳定，对其他图像 CFA 插值效果不理想；Bayer-CFA 方法对其余的 16 幅图像均获得了最好的 CFA 插值效果，且获得了最高的 r_{CPSNR} 平均值和最小的 ΔE_{ab}^* 平均值。以上客观指标说明，Bayer-CFA 具有较好的 CFA 插值效果。

表 1 的客观数据表明，与 Bayer-CFA 方法相比，最具竞争力的方法是文献[4]。然而，文献[4]的 r_{CPSNR} 不够稳定，24 幅图像中，6 幅取得了最优的效果，5 幅获得了适中的效果，其余 13 幅获得了最差的效果。分析效果最好的 6 幅图像，发现可以将其分为两类：Kodim2、Kodim8、Kodim19 属于建筑景物图；Kodim4，Kodim12、Kodim18 属于人物图。分别选择一幅纹理较多的图像 Kodim8 和 Kodim18 展示主观效果图，并和 Bayer-CFA 方法相比较，结果见图 5。



(c) 文献[4]的 Kodim18 (d) Bayer-CFA 方法的 Kodim18
图 5 文献[4]和 Bayer-CFA 方法对 Kodim8 和 Kodim18 的插值结果

图 5 中，为展示细节，截取并放大了局部图像，Kodim8 在 155 列 385 行截取分辨率为 80×110 的图像，Kodim18 在 365 列 255 行截取分辨率 185×75 的图像。从图 5a 和 5b 可知，对 Kodim8，文献[4]在减少伪彩色方面优于 Bayer-CFA 方法，在窗户等纹理较多的地方仅仅产生了少许的伪彩色。从图 5c 和 5d 的局部放大图像可知，对 Kodim18，文献[4]在项链处出现的伪彩色明显少于 Bayer-CFA 方法，但在上下嘴唇的边缘出现了非常显眼的锯齿现象，影响视觉效果。综合上述分析，文献[4]在减少伪彩色方面取得了较好的效果，但在减少锯齿现象方面，还有待进一步改进。

图 6 是对 Kodim19 和 Kodim24 两幅图像利用 Bayer-CFA 方法插值时不使用和使用梯度修正的结果。图 6a 和图 6c 为未修正结果，在图 6a 的栅栏中间位置及最右侧、图 6c 的右侧树叶及烟筒左侧的屋顶处分别出现了明显的模糊和伪彩色。图 6b 和图 6d 是修正的结果，减少了上述伪彩色，很好地改善了图像质量。可见，梯度修正能够提高插值精度。

分别使用文献[3]、文献[4]、文献[7]、文献[9]、文献[10]、文献[12]和本文方法对 Kodim7 和 Kodim20 图像进行 CFA 插值，结果见图 7 和图 8。

图 7 是从 Kodim7 图像的 338 列 144 行处截取的分辨率为 175×100 的局部放大图像，可以看出：文献[7]的花瓣和右上的树叶出现了明显的伪彩色，右下角的树叶边缘有锯齿现象；文献[4]、文献[10]和文献[12]的花瓣上的伪彩色有所改善，但右下角的树叶仍有明显的锯齿；文献[3]仅在右下角的树叶上出现少许锯齿；文献[9]获得了和 Bayer-CFA 方



(a) 文献[4]的 Kodim8



(b) Bayer-CFA 方法的 Kodim8

法相当的效果,仅在树枝上的叶茎处出现了少许伪彩色;Bayer-CFA 方法获得了最好的插值效果,没

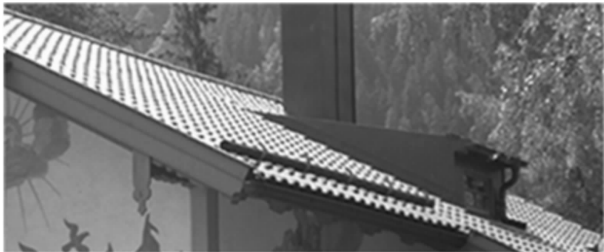
有出现伪彩色和锯齿,很好地保护了图像的边缘纹理细节。



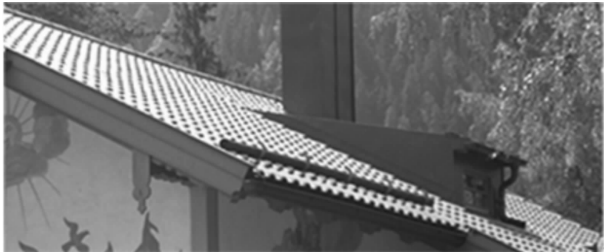
(a)Kodim19 不使用梯度修正



(b)Kodim19 使用梯度修正



(c)Kodim24 不使用梯度修正



(d)Kodim24 使用梯度修正

图 6 Bayer-CFA 方法使用和不使用梯度修正的局部放大结果



(a)原图



(b)文献[3]结果



(c)文献[4]结果



(d)文献[7]结果



(e)文献[9]结果



(f)文献[10]结果



(g)文献[12]结果



(h)文本结果

图 7 不同方法对 Kodim7 进行 CFA 插值后的局部放大结果



图 8 不同方法对 Kodim20CFA 插值后的局部放大结果

图 8 是从 Kodim20 图像的 244 列 265 行处截取的分辨率为 150×70 的局部放大图像,可以看出:文献[4]的字母周围和小女孩的轮廓处均有严重的伪彩色;文献[9]、文献[10]和文献[12]的伪彩色明显减少,尤其在小女孩的轮廓处明显改善;文献[3]和文献[7]的插值效果较好,文献[7]在字母 E 的中间一横的上边及字符串周围出现了少许伪彩色,而[3]消除了字母 E 的处的伪彩色;Bayer-CFA 方法的 CFA 插值质量最高,没有出现伪彩色和锯齿,很好地保护了图像的边缘。

4.3 算法复杂度分析

操作算子的个数取决于测试图像,大 O 阶法通过统计操作算子的计算次数来估计复杂度,是一种事前分析估计法,它利用循环嵌套的层数衡量时间复杂度。对分辨率为 $X\times Y$ 的 Bayer 图像,CFA 插值时需要插值所有像素点,循环嵌套的层数为 $X\times Y$,时间复杂度为 $O(XY)$ 。为了更好地分析算法复杂度,假设算法中每个条件出现的概率相同,表 2 列出了 7 种方法 CFA 插值时所需要的操作算子的计算次数。Bayer-CFA 方法的操作算子计算次数仅少于文献[4]和文献[12],但是文献[4]和文献[9]需要迭代,文献[10]需要训练支持向量机,均会增加运

算时间,增加算法复杂度。
表 3 是各种方法对 Kodim19 进行处理的 CPU 平均运行时间,可以看出,文献[7]的运行时间最短,Bayer-CFA 方法落后 0.078 s,但比平均性能指标位居第 2 的文献[9]快了 0.621 s。综上,Bayer-CFA 方法在 CFA 插值性能和算法复杂度上均获得了优势。

表 2 不同方法操作算子的计算次数

方法来源	计算次数				
	加/减	乘/除	移位	取绝对值	迭代
文献[3]	21	1.5	10	3	0
文献[4]	63	132	0	10	35
文献[7]	10.5	4.5	4	2	0
文献[9]	12	25	0	3	3
文献[10]	29.5	14	0	0	0
文献[12]	22	54	0	8	0
本文	29	28	0	11	0

表 3 CPU 平均运行时间

方法来源	文献[3]	文献[4]	文献[7]	文献[9]	文献[10]	文献[12]	本文
时间/s	1.341	3.924	1.287	1.977	35.143	1.542	1.356

5 结 论

边缘像素点的插值精度是影响 CFA 插值效果的关键因素。本文在考虑图像相关性的基础上利用有限差分设计插值函数,结合梯度信息构造权重因子,实现对 CFA 插值图像上丢失像素值的更精确估计,从而更逼近连续图像。图像梯度含有边缘信息,沿着边缘方向插值能有效削弱锯齿现象。用梯度信息构造 8 个方向的权重因子,结合像素点的空间位置,利用距离决定 8 个权重因子的加权系数,完成修正后能有效提高插值精度。相较于 EET 和 SSA 方法,Bayer-CFA 方法的 r_{CPSNR} 分别提高了 0.57 dB 和 1.79 dB,且能很好地保护图像的边缘细节。

参考文献:

- [1] BAYER B E. Color imaging array: US 3971065 [P]. 1976-07-20.
- [2] TAN D S, CHEN W Y, HUA K L. Deep demosaicking: adaptive image demosaicking via multiple deep fully convolutional networks [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2018, 27(5): 2408-2419.
- [3] LIEN C Y, YANG F J, CHEN P Y. An efficient edge-based technique for color filter array demosaicking [J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17(13): 4067-4074.
- [4] KWON J Y, PARK S. W, PARK M K, et al. Aliasing artifacts reduction with subband signal analysis for demosaicked images [J]. Digital Signal Processing, 2016, 59: 115-128.
- [5] KIMMEL R. Demosaicing: image reconstruction from color CCD samples [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1999, 8(9): 1221-1228.
- [6] LUKAC R, PLATANIS K N. Normalized color-ratio modeling for CFA interpolation [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2004, 50(2): 737-745.
- [7] PEI S C, TAM I K. Effective color interpolation in CCD color filter arrays using signal correlation [J]. IEEE Transactions on Circuits Systems and Video Technology, 2003, 13(6): 503-513.
- [8] TSAI C Y, SONG K T. Heterogeneity-projection hard-decision color interpolation using spectral-spatial correlation [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2007, 16(1): 78-91.
- [9] 黄丽丽,肖亮,韦志辉. 彩色图像去马赛克的非局部稀疏表示方法 [J]. 电子学报, 2014, 42(2): 272-279. HUANG Lili, Xiao Liang, Wei Zhihui. A nonlocal sparse representation method for color demosaicking [J]. Acta Electronica Sinica, 2014, 42(2): 272-279.
- [10] 贾晓芬,马立勇,马家辰. 基于支持向量机的彩色滤波阵列插值方法 [J]. 四川大学学报(工程科学版), 2010, 42(3): 145-150. JIA Xiaofen, MA Liyong, MA Jiachen. Support vector machines based color filter array interpolation scheme [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2010, 42(3): 145-150.
- [11] JIA X F, ZHAO B T, ZHOU M R, et al. An edge-adaptive demosaicking method based on image correlation [J]. Journal of Central South University, 2015, 22(4): 1397-1404.
- [12] BUADES A, COLL B, MOREL J M, et al. Self-similarity driven color demosaicking [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2009, 18(6): 1192-1202.
- [13] IBRAHIM P, YUCEL A. Multiscale gradients-based color filter array interpolation [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2013, 22(1): 157-165.
- [14] ZHU S Y, ZENG B, ZENG L Y, et al. Image interpolation based on non-local geometric similarities and directional gradients [J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2016, 18(9): 1707-1719.
- [15] JAIN A K, JAIN J R. Partial differential equations and finite difference methods in image processing: part 2 Image restoration [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1978, 23(5): 817-834.
- [16] JAIN A K. Partial differential equations and finite-difference methods in image processing: part 1 Image representation [J]. Journal of Optimization Theory and Applications, 1977, 23(1): 65-91.
- [17] YANG G S, ZHANG H L, YANG Y L. Study of image mosaic based on the method of finite difference [C] // Proceedings of 1st International Congress on Image and Signal Processing. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2008: 436-440.
- [18] SPIEGEL R J, FATMI M B, KUNZ K S. Application of a finite-difference technique to the human radio frequency dosimetry problem [J]. Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy, 1985, 20(4): 241-254.

(编辑 陶晴)