



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 102665030 A

(43) 申请公布日 2012. 09. 12

(21) 申请号 201210147381. 7

(22) 申请日 2012. 05. 14

(71) 申请人 浙江大学

地址 310027 浙江省杭州市西湖区浙大路  
38 号

(72) 发明人 谢磊 陈惠芳 任浩

(74) 专利代理机构 杭州求是专利事务所有限公  
司 33200

代理人 杜军

(51) Int. Cl.

H04N 1/58 (2006. 01)

H04N 9/04 (2006. 01)

H04N 9/64 (2006. 01)

权利要求书 3 页 说明书 16 页 附图 2 页

(54) 发明名称

一种基于改进双线性的 Bayer 格式颜色插值方法

(57) 摘要

本发明公布了一种基于改进双线性的 Bayer 格式颜色插值方法。现有方法对色差进行处理时运算量较大, 复杂度高, 对数字相机成像速度有明显的影响, 延时较高。本发明在重建全彩色图像的过程中, 采用绿色分量和红蓝分量分步插值的组合方式实现颜色恢复。首先利用图像的空间相关性严格区分图像边缘, 重建全分辨率绿色分量; 然后通过改进的双线性的插值算法和已恢复的绿色分量的修正补偿来重建全分辨率的红蓝分量。相比于传统的插值算法, 恢复得到的全彩色图像颜色信号的峰值信噪比更高, 同时还具有在算法运算复杂度没有增加的情况下插值出的图像效果更为理想的优点。

$B$	$G$	$B_{(i-2)j}$	$G$	$B$
$G$	$R$	$G_{(i-1)j}$	$R$	$G$
$B_{i(j-2)}$	$G_{i(j-1)}$	$B_{ij}$	$G_{i(j+1)}$	$B_{i(j+2)}$
$G$	$R$	$G_{(i+1)j}$	$R$	$G$
$B$	$G$	$B_{(i+2)j}$	$G$	$B$

1. 一种基于改进双线性的 Bayer 格式颜色插值方法,其特征在于该方法包括以下步骤:

步骤 1. 重建全分辨率绿色分量  $G$ , 具体是:

在仅包含蓝色分量  $B$  的像素采样点处,从水平方向和垂直方向综合考虑当前点邻域的绿色分量  $G$  及蓝色分量  $B$ , 计算水平方向梯度  $\alpha_1$  和垂直方向梯度  $\beta_1$ , 比较两个方向梯度的大小关系,当  $\alpha_1 < \beta_1$  时,则水平方向作为当前点的边缘检测参考方向,选择当前点水平方向上相邻的两个绿色分量  $G$  和两个蓝色分量  $B$  以及当前的蓝色分量  $B$  来计算当前点所缺失的绿色分量  $G$ ; 当  $\alpha_1 > \beta_1$  时,则垂直方向作为当前点的边缘检测参考方向,选择当前点垂直方向上相邻的两个绿色分量  $G$  和两个蓝色分量  $B$  以及当前的蓝色分量  $B$  来计算当前点所缺失的绿色分量  $G$ ; 当  $\alpha_1 = \beta_1$  时,则选择该像素点周围四个绿色分量  $G$  和四个蓝色分量  $B$  以及当前的蓝色分量  $B$  来计算当前所缺失的绿色分量;

在仅包含红色分量  $R$  的像素采样点处,其水平方向梯度  $\alpha_2$ 、垂直方向梯度  $\beta_2$  分别由相邻的绿色分量  $G$  和红色分量  $R$  共同计算所得;该点处所缺失的绿色分量  $G$  的计算与在仅包含蓝色分量  $B$  的像素采样点处计算缺失的绿色分量  $G$  的插值过程相同;从水平方向和垂直方向综合考虑当前点邻域的绿色分量  $G$  及红色分量  $R$ , 计算水平方向梯度  $\alpha_2$  和垂直方向梯度  $\beta_2$ , 比较两个方向梯度的大小关系,当  $\alpha_2 < \beta_2$  时,则水平方向作为当前点的边缘检测参考方向,选择当前点水平方向上相邻的两个绿色分量  $G$  和两个红色分量  $R$  以及当前的红色分量  $R$  来计算当前点所缺失的绿色分量  $G$ ; 当  $\alpha_2 > \beta_2$  时,则垂直方向作为当前点的边缘检测参考方向,选择当前点垂直方向上相邻的两个绿色分量  $G$  和两个红色分量  $R$  以及当前的红色分量  $R$  来计算当前点所缺失的绿色分量  $G$ ; 当  $\alpha_2 = \beta_2$  时,则选择该像素点周围四个绿色分量  $G$  和四个红色分量  $R$  以及当前的红色分量  $R$  来计算当前所缺失的绿色分量;

步骤 2. 重建全分辨率红色分量  $R$ , 具体是:

在包含蓝色分量  $B$  的像素采样点处,用具有边缘检测的改进型双线性插值算法计算  $R$  分量,具体是:从水平方向、垂直方向、 $45^\circ$  方向及  $135^\circ$  方向四个方向,综合考虑当前点邻域的绿色分量  $G$  及红色分量  $R$ , 进行图像边缘检测;计算垂直方向梯度  $\alpha_B$  和水平方向梯度  $\beta_B$ , 比较  $\alpha_B$ 、 $\beta_B$  的值,选择数值较小的方向作为当前像素采样点的边缘参考方向;同时也考虑加入了  $G$  分量的修正;

(1) 当  $\alpha_B < \beta_B$  时,则垂直方向作为当前点的边缘方向,选择当前点水平方向上相邻的两个绿色分量  $G$  作为当前像素采样点的边缘检测参考方向点;

(2) 当  $\alpha_B \geq \beta_B$  时,则水平方向作为当前点的边缘方向,选择当前点垂直方向上相邻的两个绿色分量  $G$  作为当前像素采样点的边缘检测参考方向点;

其次是结合比较  $45^\circ$  方向及  $135^\circ$  方向,考虑临近同像素分量,并加入绿色分量的修正;引入阈值  $k$ ;

当 $\alpha_B < b_B$ 并且 $\alpha_B < k$ 时,则 $45^\circ$ 方向作为当前点的边缘方向,选择当前点 $45^\circ$ 方向上相邻的红色分量 $R$ 作为当前像素采样点的边缘检测参考方向点;并考虑相邻的两个绿色分量 $G$ 的作为修正;

当 $\alpha_B \geq b_B$ 并且 $b_B < k$ 时,则 $135^\circ$ 方向作为当前点的边缘方向,选择当前点 $135^\circ$ 方向上相邻的红色分量 $R$ 作为当前像素采样点的边缘检测参考方向点;并考虑相邻的两个绿色分量 $G$ 的作为修正;

计算当前像素点与邻近上、下、左、右四个方向的绿色分量的差值,分别是 $e$ 、 $f$ 、 $g$ 、 $h$ ,综合考虑垂直方向梯度 $\alpha_B$ 和水平方向梯度 $b_B$ 的大小;

当 $\alpha_B \geq b_B$ 并且 $k \leq b_B$ 、 $e < f$ 时,则选择当前绿色像素点邻近的向上方向的绿色像素点作为计算红色分量的参考点,计算缺失的红色分量;

当 $\alpha_B \geq b_B$ 并且 $k \leq b_B$ 、 $e \geq f$ 时,则选择当前绿色像素点邻近的向下方向的绿色像素点作为计算红色分量的参考点,计算缺失的红色分量;

当 $\alpha_B < b_B$ 并且 $k \leq \alpha_B$ 、 $g < h$ 时,则选择当前绿色像素点邻近的向左方向的绿色像素点作为计算红色分量的参考点,计算缺失的红色分量;

当 $\alpha_B < b_B$ 并且 $k \leq \alpha_B$ 、 $g \geq h$ 时,则选择当前绿色像素点邻近的向右方向的绿色像素点作为计算红色分量的参考点,计算缺失的红色分量;

对于 $G$ 分量上的 $R$ 分量的计算,考虑邻近的红色分量 $R$ ,并且参考邻近的相应绿色分量 $G$ 的修正;

步骤3. 重建全分辨率蓝色分量 $B$ ,具体是:

在包含红色分量 $R$ 的像素采样点处,用具有边缘检测的改进型双线性插值算法计算 $B$ 分量,具体是:从水平方向、垂直方向、 $45^\circ$ 方向及 $135^\circ$ 方向四个方向,综合考虑当前点邻近的绿色分量 $G$ 及蓝色分量 $B$ ,进行图像边缘检测;计算垂直方向梯度 $\alpha_R$ 和水平方向梯度 $b_R$ ,比较 $\alpha_R$ 、 $b_R$ 的值,选择数值较小的方向作为当前像素采样点的边缘参考方向;同时也考虑加入了 $G$ 分量的修正;

(1) 当 $\alpha_R < b_R$ 时,则垂直方向作为当前点的边缘方向,选择当前点垂直方向上相邻的两个绿色分量 $G$ 作为当前像素采样点的边缘检测参考方向点;

(2) 当 $\alpha_R \geq b_R$ 时,则水平方向作为当前点的边缘方向,选择当前点水平方向上相邻的两个绿色分量 $G$ 作为当前像素采样点的边缘检测参考方向点;

其次是结合比较 $45^\circ$ 方向及 $135^\circ$ 方向,考虑临近同像素分量,并加入绿色分量的修正;引入阈值 $k$ ;

当 $\alpha_R < b_R$ 并且 $\alpha_R < k$ 时,则 $45^\circ$ 方向作为当前点的边缘方向,选择当前点 $45^\circ$ 方向上相邻的蓝色分量 $B$ 作为当前像素采样点的边缘检测参考方向点;并考虑相邻的两个绿色分量 $G$ 的作为修正;

当 $\alpha_R \geq b_R$ 并且 $b_R < k$ 时,则 $135^\circ$ 方向作为当前点的边缘方向,选择当前点 $135^\circ$ 方向

上相邻的蓝色分量  $B$  作为当前像素采样点的边缘检测参考方向点；并考虑相邻的两个绿色分量  $G$  的作为修正；

计算当前像素点与邻近上、下、左、右四个方向的绿色分量的差值，分别是  $e$ 、 $f$ 、 $g$ 、 $h$ ，综合考虑垂直方向梯度  $a_x$  和水平方向梯度  $b_x$  的大小；

当  $a_x \geq b_x$  并且  $k \leq b_x$ 、 $e < f$  时，则选择当前绿色像素点邻近的向上方向的绿色像素点作为计算蓝色分量的参考点，计算缺失的蓝色分量；

当  $a_x \geq b_x$  并且  $k \leq b_x$ 、 $e \geq f$  时，则选择当前绿色像素点邻近的向下方向的绿色像素点作为计算蓝色分量的参考点，计算缺失的蓝色分量；

当  $a_x < b_x$  并且  $k \leq a_x$ 、 $g < h$  时，则选择当前绿色像素点邻近的向左方向的绿色像素点作为计算蓝色分量的参考点，计算缺失的蓝色分量；

当  $a_x < b_x$  并且  $k \leq a_x$ 、 $g \geq h$  时，则选择当前绿色像素点邻近的向右方向的绿色像素点作为计算蓝色分量的参考点，计算缺失的蓝色分量；

对于  $G$  分量上的蓝色分量  $B$  的计算，考虑邻近的蓝色分量  $B$ ，并且参考邻近的相应绿色分量  $G$  的修正。

## 一种基于改进双线性的 Bayer 格式颜色插值方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于数字图像处理技术领域,涉及一种基于绿色分量和边缘检测的 Bayer 格式颜色插值方法,具体是一种绿色分量和红蓝分量分步插值的组合方式实现颜色恢复的方法。

### 背景技术

[0002] 随着数码相机、扫描仪和其他计算机输入设备越来越普及,作为图像系统中最重要的组成部分,CCD 和 CMOS 传感器也逐渐的被人们所熟知。为了能够得到对原始图像最详尽的描述,一般需要三组 CCD 传感器。然而为了降低体积和成本,大多数的数字静态摄像机(数码相机、数字视频录像机等)都只使用一组 CCD 或 CMOS 传感器。一般会在数字相机图像传感器上覆盖颜色滤波阵列,因为 Bayer 格式颜色滤波阵列具有很好的颜色信号敏感性和颜色恢复特性,而每一个敏感点只允许一种颜色分量通过,因此图像的每一个像素点都只有一种颜色灰度值。为了恢复完整的彩色图像,需要通过颜色插值技术利用每个采样点周围的颜色来计算另外两种缺失的颜色分量。目前数字相机系统中,大多数颜色滤波阵列只有一种颜色分量有较高的采样频率,相比其他两种颜色分量采样也较多。在 Bayer 格式颜色滤波阵列中,绿色分量(G)是红色分量(R)或蓝色分量(B)的两倍,占图像总采样点的一半,包含更多的图像信息,并且由于人眼对绿色分量较红色分量和蓝色分量更为敏感,因此大多颜色插值算法一般先重建图像每个像素点的绿色分量,然后再重建另外两种颜色分量。目前比较典型的颜色插值算法有以下几种:

双线性插值算法:该算法在对一个像素点的某种颜色值进行插值运算时,用与该点相邻的同种像素点的对应像素值,通过算术平均来计算。每估算一个像素点的两个未知颜色值将会用到与其相邻的 8 个像素点的像素值,计算时涉及到的相关像素较多。

[0003] 基于连续色调的插值算法:该算法是第一个用到数码相机里的插值算法,是根据图像色调具有相关性来完成插值的。该算法主要包括两个步骤:首先使用双线性插值算法对像素点 G 进行估计,然后再根据色调相关性估计出其他两个未知的像素值。

[0004] 边缘导向插值算法:这种方法的提出主要是为了克服边缘的模糊问题。在插值过程中,首先比较水平方向上和垂直方向上的梯度大小,插值时取梯度较小的方向上的像素点作为估算点计算当前待求颜色分量值。为了尽量减少算法复杂度,首先利用该算法重建图像每个像素点的绿色分量,然后利用双线性和已重建的绿色分量的补偿修正来恢复红色和蓝色分量。

[0005] 基于渐进的插值算法:该算法利用了人眼对于绿色分量比较敏感的视觉特性来实现插值。该算法主要包括两个步骤:首先使用边缘导向插值算法对像素 G 完成估计。然后利用估计出的 G 分量再来估计其他两个未知像素值,同时考虑先前估计出的绿色分量的修正。

[0006] 适应性颜色层插值算法:该算法对红、绿、蓝三种分量均采用基于边缘导向插值算法进行插值恢复,该算法在考虑图像边缘的时候,是通过绿色分量 G 及红色 R 或蓝色 B 分量

来确定的。

[0007] 中值滤波颜色插值算法：该算法主要包括三个步骤：首先采用双线性颜色插值算法分别计算出图像所有像素点的红色 R、绿色 G、蓝色 B 三个颜色分量的值，然后对这三个颜色分量相互之间的差值分别进行中值滤波，其主要作用是消除双线性颜色插值算法所带来的误差，特别是对伪彩色的抑制效果非常好。

[0008] 早期的双线性插值算法由于采用的是一种简单的算术平均，并且没有边缘检测，因此对于色调变化比较明显的图像进行插值，会导致边缘模糊，图像高频细节失真比较明显，纹理表现不够准确，恢复的图像总体视觉效果并不理想。同时，该算法计算时候涉及到的相关像素点较多，处理器的计算量大。基于连续色调的插值算法，较双线性插值算法，其插值效果有了较大的提高。但是，该算法没有进行边缘的区分检测，当色调出现突变时，效果就不会理想，同时，该算法绿色分量的估计是采用双线性插值算法，所以在插值时候所涉及到的像素点的数目仍然较多，而且还会出现乘法和除法的运算，因此处理器的运算量被大大增加。边缘导向插值算法的提出，最重要的贡献是进行了图像边缘检测，解决了图像边缘模糊的问题，因此纹理和边缘的表现较双线性插值算法有了较大提高。基于渐进的插值算法，虽然考虑到了图像边缘检测，但是由于采用的边缘检测方法比较简单，只是对水平和垂直方向进行检测，因此在图像边缘处仍然有不小失真。适应性颜色层插值算法是在边缘导向插值算法的基础上改进而来，进一步降低了图像的边缘模糊及颜色失真，恢复的图像边缘的定位更为准确，视觉效果较理想。该算法的算法复杂度较高，开销较大。中值滤波对图像的边缘表现效果较好，失真较小，且对伪彩色的抑制效果特别好，颜色失真也较小，但是最大的缺点就是对色差进行中值滤波处理的运算量较大，其复杂度太高，对数码相机成像速度有明显的影响，延时较高。

## 发明内容

[0009] 本发明的目的在于提供一种利用相关性和边缘检测的基于绿色分量的 Bayer 格式颜色插值方法，它是一种新型的充分利用图像相关性和边缘检测的 Bayer 格式图像颜色插值方法。该方法先恢复缺失的绿色分量，然后利用重建的绿色分量修正补偿以重建红蓝分量，在重建红蓝分量的过程中，充分考虑图像边缘检测规则，专门用于降低颜色失真现象，抑制插值过程中产生的伪色，防止色彩跳变，增强色彩平滑度，提高图像细节纹理和边缘以及色彩方面的表现准确度，降低边缘的模糊程度；同时，该方法既保留了双线性算法的图像局部一致性好、算法简单等优点，同时又降低了参与计算的像素点数目，减少了运算量，再加上图像相关性和三角边缘检测方法的引入，使得算法复杂度没有提高的情况下可以插值出较好的图像。

[0010] 本发明提供的 Bayer 格式图像颜色插值方法在重建全彩色图像的过程中，采用绿色分量和红蓝分量分步插值的组合方式实现颜色恢复。首先利用图像的空间相关性严格区分图像边缘，重建全分辨率绿色分量；然后通过改进的双线性的插值算法和已恢复的绿色分量的修正补偿来重建全分辨率的红蓝分量。相比于传统的插值算法，恢复得到的全彩色图像颜色信号的峰值信噪比更高，同时还具有在算法运算复杂度没有增加的情况下插值出的图像效果更为理想的优点。

[0011] 在具体实施方式的阐述过程中，符号  $R$ 、 $G$ 、 $B$  分别表示图像红色分量、绿色分量、

蓝色分量,符号  $R_{ij}$ 、 $G_{ij}$ 、 $B_{ij}$  分别表示图像第  $i$  行和第  $j$  列像素点的红色分量、绿色分量、蓝色分量。

[0012] 本发明方法包括全分辨率绿色分量  $G$  的重建、全分辨率红色分量  $R$  和全分辨率蓝色分量  $B$  的重建三个内容。

[0013] 本发明的具体步骤是：

步骤 1. 重建全分辨率绿色分量  $G$ , 具体是：

在仅包含蓝色分量  $B$  的像素采样点处,从水平方向和垂直方向综合考虑当前点邻域的绿色分量  $G$  及蓝色分量  $B$ ,计算水平方向梯度  $\alpha_1$  和垂直方向梯度  $\beta_1$ ,比较两个方向梯度的大小关系,当  $\alpha_1 < \beta_1$  时,则水平方向作为当前点的边缘检测参考方向,选择当前点水平方向上相邻的两个绿色分量  $G$  和两个蓝色分量  $B$  以及当前的蓝色分量  $B$  来计算当前点所缺失的绿色分量  $G$ ;当  $\alpha_1 > \beta_1$  时,则垂直方向作为当前点的边缘检测参考方向,选择当前点垂直方向上相邻的两个绿色分量  $G$  和两个蓝色分量  $B$  以及当前的蓝色分量  $B$  来计算当前点所缺失的绿色分量  $G$ ;当  $\alpha_1 = \beta_1$  时,则选择该像素点周围四个绿色分量  $G$  和四个蓝色分量  $B$  以及当前的蓝色分量  $B$  来计算当前所缺失的绿色分量。

[0014] 在仅包含红色分量  $R$  的像素采样点处,其水平方向梯度  $\alpha_2$ 、垂直方向梯度  $\beta_2$  分别由相邻的绿色分量  $G$  和红色分量  $R$  共同计算所得。该点处所缺失的绿色分量  $G$  的计算与在仅包含蓝色分量  $B$  的像素采样点处计算缺失的绿色分量  $G$  的插值过程相同。从水平方向和垂直方向综合考虑当前点邻域的绿色分量  $G$  及红色分量  $R$ ,计算水平方向梯度  $\alpha_2$  和垂直方向梯度  $\beta_2$ ,比较两个方向梯度的大小关系,当  $\alpha_2 < \beta_2$  时,则水平方向作为当前点的边缘检测参考方向,选择当前点水平方向上相邻的两个绿色分量  $G$  和两个红色分量  $R$  以及当前的红色分量  $R$  来计算当前点所缺失的绿色分量  $G$ ;当  $\alpha_2 > \beta_2$  时,则垂直方向作为当前点的边缘检测参考方向,选择当前点垂直方向上相邻的两个绿色分量  $G$  和两个红色分量  $R$  以及当前的红色分量  $R$  来计算当前点所缺失的绿色分量  $G$ ;当  $\alpha_2 = \beta_2$  时,则选择该像素点周围四个绿色分量  $G$  和四个红色分量  $R$  以及当前的红色分量  $R$  来计算当前所缺失的绿色分量。

[0015] 步骤 2. 重建全分辨率红色分量  $R$ , 具体是：

在包含蓝色分量  $B$  的像素采样点处,用具有边缘检测的改进型双线性插值算法计算红色分量  $R$ ,具体是:从水平方向、垂直方向、 $45^\circ$  方向及  $135^\circ$  方向四个方向,综合考虑当前点邻域的绿色分量  $G$  及红色分量  $R$ ,进行图像边缘检测。首先计算垂直方向梯度  $\alpha_B$  和水平方向梯度  $\beta_B$ ,通过比较  $\alpha_B$ 、 $\beta_B$  的值,选择数值较小的方向作为当前像素采样点的边缘参考方向。通过  $G$  分量修正。

[0016] (1) 当  $\alpha_B < \beta_B$  时,则垂直方向作为当前点的边缘方向,选择当前点垂直方向上相邻的两个绿色分量  $G$  作为当前像素采样点的边缘检测参考方向点。

[0017] (2) 当  $\alpha_B \geq \beta_B$  时,则水平方向作为当前点的边缘方向,选择当前点水平方向上相邻的两个绿色分量  $G$  作为当前像素采样点的边缘检测参考方向点。

[0018] 其次是结合比较  $45^\circ$  方向及  $135^\circ$  方向,考虑邻近同分量像素,通过绿色分量修正。引入阈值  $k$ 。

[0019] 当  $a_B < b_B$  并且  $a_B < k$  时,则  $45^\circ$  方向作为当前点的边缘方向,选择当前点  $45^\circ$  方向上相邻的红色分量  $R$  作为当前像素采样点的边缘检测参考方向点。通过相邻的两个绿色分量  $G$  修正。

[0020] 当  $a_B \geq b_B$  并且  $b_B < k$  时,则  $135^\circ$  方向作为当前点的边缘方向,选择当前点  $135^\circ$  方向上相邻的红色分量  $R$  作为当前像素采样点的边缘检测参考方向点。通过相邻的两个绿色分量  $G$  修正。

[0021] 计算当前像素点与邻近上、下、左、右四个方向的绿色分量的差值,分别是  $e$ 、 $f$ 、 $g$ 、 $h$ ,综合考虑垂直方向梯度  $a_B$  和水平方向梯度  $b_B$  的大小。

[0022] 当  $a_B \geq b_B$  并且  $k \leq b_B$ 、 $e < f$  时,则选择当前蓝色像素点邻近的向上方向的绿色像素点作为计算红色分量的参考点,计算缺失的红色分量。

[0023] 当  $a_B \geq b_B$  并且  $k \leq b_B$ 、 $e \geq f$  时,则选择当前蓝色像素点邻近的向下方向的绿色像素点作为计算红色分量的参考点,计算缺失的红色分量。

[0024] 当  $a_B < b_B$  并且  $k \leq a_B$ 、 $g < h$  时,则选择当前蓝色像素点邻近的向左方向的绿色像素点作为计算红色分量的参考点,计算缺失的红色分量。

[0025] 当  $a_B < b_B$  并且  $k \leq a_B$ 、 $g \geq h$  时,则选择当前蓝色像素点邻近的向右方向的绿色像素点作为计算红色分量的参考点,计算缺失的红色分量。

[0026] 对于  $G$  分量上的  $R$  分量的计算,考虑邻近的红色分量  $R$ ,通过邻近的相应绿色分量  $G$  修正。

[0027] 步骤 3. 重建全分辨率蓝色分量  $B$ ,具体是:

在包含红色分量  $R$  的像素采样点处,用具有边缘检测的改进型双线性插值算法计算蓝色分量  $B$ ,具体是:从水平方向、垂直方向、 $45^\circ$  方向及  $135^\circ$  方向四个方向,综合考虑当前点邻域的绿色分量  $G$  及蓝色分量  $B$ ,进行图像边缘检测。首先计算垂直方向梯度  $a_R$  和水平方向梯度  $b_R$ ,通过比较  $a_R$ 、 $b_R$  的值,选择数值较小的方向作为当前像素采样点的边缘参考方向。通过  $G$  分量修正。

[0028] (1) 当  $a_R < b_R$  时,则垂直方向作为当前点的边缘方向,选择当前点垂直方向上相邻的两个绿色分量  $G$  作为当前像素采样点的边缘检测参考方向点。

[0029] (2) 当  $a_R \geq b_R$  时,则水平方向作为当前点的边缘方向,选择当前点水平方向上相邻的两个绿色分量  $G$  作为当前像素采样点的边缘检测参考方向点。

[0030] 其次是结合比较  $45^\circ$  方向及  $135^\circ$  方向,考虑邻近同分量像素,通过相邻的两个绿色分量修正。引入阈值  $k$ 。

[0031] 当  $a_R < b_R$  并且  $a_R < k$  时,则  $45^\circ$  方向作为当前点的边缘方向,选择当前点  $45^\circ$  方向上相邻的蓝色分量  $B$  作为当前像素采样点的边缘检测参考方向点。通过相邻的两个绿色分量  $G$  修正。



[0032] 当 $a_x \geq b_x$ 并且 $b_x < k$ 时,则 $135^\circ$ 方向作为当前点的边缘方向,选择当前点 $135^\circ$ 方向上相邻的蓝色分量B作为当前像素采样点的边缘检测参考方向点。通过相邻的两个绿色分量G修正。

[0033] 计算当前像素点与邻近上、下、左、右四个方向的绿色分量的差值,分别是e、f、g、h,综合考虑垂直方向梯度 $a_x$ 和水平方向梯度 $b_x$ 的大小。

[0034] 当 $a_x \geq b_x$ 并且 $k \leq b_x$ 、 $e < f$ 时,则选择当前红色像素点邻近的向上方向的绿色像素点作为计算蓝色分量的参考点,计算缺失的蓝色分量。

[0035] 当 $a_x \geq b_x$ 并且 $k \leq b_x$ 、 $e \geq f$ 时,则选择当前红色像素点邻近的向下方向的绿色像素点作为计算蓝色分量的参考点,计算缺失的蓝色分量。

[0036] 当 $a_x < b_x$ 并且 $k \leq a_x$ 、 $g < h$ 时,则选择当前红色像素点邻近的向左方向的绿色像素点作为计算蓝色分量的参考点,计算缺失的蓝色分量。

[0037] 当 $a_x < b_x$ 并且 $k \leq a_x$ 、 $g \geq h$ 时,则选择当前红色像素点邻近的向右方向的绿色像素点作为计算蓝色分量的参考点,计算缺失的蓝色分量。

[0038] 对于G分量上的蓝色分量B的计算,考虑邻近的蓝色分量B,通过邻近的相应绿色分量G修正。

[0039] 本发明的有益效果:本发明有效降低了在颜色插值过程中产生边缘模糊和色彩失真,解决了双线性插值方法所带来的图像效果不理想、边缘模糊、图像纹理和细节表现不准确、色彩失真严重等问题。边缘判断更准确、色彩平滑度更高以及恢复的图像各颜色分量峰值信噪比更高,图像效果更好,并且计算复杂度较低。

## 附图说明

[0040] 图1为计算蓝色分量 $B_y$ 像素点所缺失的绿色分量 $G_y$ 示意图;

图2为计算特殊点 $B_{44}$ 像素点的绿色分量 $G_{44}$ 示意图;

图3为计算红色分量 $R_y$ 像素点所缺失的绿色分量 $G_y$ 示意图;

图4为计算特殊点 $R_{33}$ 像素点的绿色分量 $G_{33}$ 示意图;

图5为计算蓝色分量 $B_y$ 像素点所缺失的红色分量 $R_y$ 示意图;

图6为计算特殊点 $B_{44}$ 像素点所缺失的红色分量 $R_{44}$ 示意图;

图7为计算红色分量 $R_y$ 像素点所缺失的蓝色分量 $B_y$ 示意图;

图8为计算特殊点 $R_{33}$ 像素点所缺失的蓝色分量 $B_{33}$ 示意图。

## 具体实施方式

[0041] 以下结合附图对本发明作进一步说明。

[0042] 步骤1. 重建全分辨率绿色分量G

在Bayer格式颜色滤波阵列中,绿色分量采样点数占图像总采样点数的一半,是红色

分量或蓝色分量采样点数的两倍,包含更多的图像信息,并且人眼对绿色较红色和蓝色敏感,对亮度较色彩敏感,而从 RGB 到 YUV 的颜色空间转换中,绿色分量对亮度 Y 的贡献接近 60%,亮度 Y 计算:

$$Y = 0.299R + 0.587G + 0.114B. \quad (1)$$

因此全分辨率绿色分量的重建在全彩色图像恢复过程中最重要,分量 G 的重建采用自适应算法计算,其具体方法是:

在仅包含蓝色分量 B 的像素采样点处,从水平方向和垂直方向综合考虑当前点邻域的绿色分量 G 及蓝色分量 B,计算水平方向梯度  $\alpha_1$  和垂直方向梯度  $\beta_1$ ,选择梯度较小的方向作为当前像素采样点的边缘方向。以图 1 中所示计算  $B_y$  像素点的绿色分量  $G_y$  为例,其水平方向的梯度  $\alpha_1$ 、垂直方向的梯度  $\beta_1$  分别为:

$$\alpha_1 = |2B_y - B_{i(j-2)} - B_{i(j+2)}| + |G_{i(j-1)} - G_{i(j+1)}| \quad (2)$$

$$\beta_1 = |2B_y - B_{(i-2)y} - B_{(i+2)y}| + |G_{(i-1)y} - G_{(i+1)y}| \quad (3)$$

通过比较两个方向梯度的大小关系,当  $\alpha_1 < \beta_1$  时,则水平方向作为当前点  $B_y$  的边缘检测参考方向,选择当前点  $B_y$  水平方向上相邻的两个绿色分量  $G_{i(j-1)}$ 、 $G_{i(j+1)}$  和两个蓝色分量  $B_{i(j-2)}$ 、 $B_{i(j+2)}$  以及当前的蓝色分量  $B_y$  来计算当前点所缺失的绿色分量  $G_y$ ; 当  $\alpha_1 > \beta_1$  时,则垂直方向作为当前点  $B_y$  的边缘检测参考方向,选择当前点  $B_y$  垂直方向上相邻的两个绿色分量  $G_{(i-1)y}$ 、 $G_{(i+1)y}$  和两个蓝色分量  $B_{(i-2)y}$ 、 $B_{(i+2)y}$  以及当前的蓝色分量  $B_y$  来计算当前点所缺失的绿色分量  $G_y$ 。当  $\alpha_1 = \beta_1$  时,则选择该像素点  $B_y$  周围四个绿色分量  $G_{i(j-1)}$ 、 $G_{i(j+1)}$ 、 $G_{(i-1)y}$ 、 $G_{(i+1)y}$  和四个蓝色分量  $B_{i(j-2)}$ 、 $B_{i(j+2)}$ 、 $B_{(i-2)y}$ 、 $B_{(i+2)y}$  以及当前的蓝色分量  $B_y$  来计算当前所缺失的绿色分量  $G_y$ 。其计算公式为:

$$G_y = \begin{cases} \frac{G_{i(j-1)} + G_{i(j+1)}}{2} + \frac{2 \times B_y - B_{i(j-2)} - B_{i(j+2)}}{4} & \alpha_1 < \beta_1 \\ \frac{G_{(i-1)y} + G_{(i+1)y}}{2} + \frac{2 \times B_y - B_{(i-2)y} - B_{(i+2)y}}{4} & \alpha_1 > \beta_1 \\ \frac{G_{(i-1)y} + G_{i(j-1)} + G_{i(j+1)} + G_{(i+1)y}}{4} + \frac{4 \times B_y - B_{(i-2)y} - B_{i(j-2)} - B_{i(j+2)} - B_{(i+2)y}}{8} & \alpha_1 = \beta_1 \end{cases} \quad (4)$$

以图 2 中像素采样点  $B_{44}$  为例,计算该像素点的绿色分量  $G_{44}$ ,则该像素点的水平方向的梯度  $\alpha_1$ 、垂直方向的梯度  $\beta_1$  分别为:

$$\alpha_1 = |2B_{44} - B_{24} - B_{64}| + |G_{23} - G_{25}| \quad (5)$$

$$\beta_1 = |2B_{44} - B_{44} - B_{64}| + |G_{34} - G_{54}| \quad (6)$$

根据水平、垂直方向的梯度  $\alpha_1$ 、 $\beta_1$  的大小关系,有:

$$G_{44} = \begin{cases} \frac{G_{43} + G_{45}}{2} + \frac{2 \times B_{44} - B_{42} - B_{46}}{4} & \alpha_1 < \beta_1 \\ \frac{G_{34} + G_{54}}{2} + \frac{2 \times B_{44} - B_{24} - B_{64}}{4} & \alpha_1 > \beta_1 \\ \frac{G_{34} + G_{43} + G_{45} + G_{54}}{4} + \frac{4 \times B_{44} - B_{24} - B_{42} - B_{46} - B_{64}}{8} & \alpha_1 = \beta_1 \end{cases} \quad (7)$$

以特殊像素点  $B_{24}$  为例, 则图像水平方向的梯度  $\alpha_1$ 、垂直方向的梯度  $\beta_1$  分别为:

$$\alpha_1 = |2B_{24} - B_{22} - B_{26}| + |G_{23} - G_{25}| \quad (8)$$

$$\beta_1 = |B_{24} - B_{44}| + |G_{34}| \quad (9)$$

比较以上两个梯度值, 选择较小的方向作为当前点的边缘方向。

[0043] 当  $\alpha_1 < \beta_1$  时, 即水平方向边缘差值较小, 则水平方向作为当前点  $B_{24}$  的边缘方向, 选择当前点  $B_{24}$  水平方向上相邻的两个绿色分量  $G_{23}$ 、 $G_{25}$  和两个蓝色分量  $B_{22}$ 、 $B_{26}$  以及当前的蓝色分量  $B_{24}$  来计算当前点所缺失的绿色分量  $G_{24}$ , 计算方法如下:

$$G_{24} = \frac{G_{23} + G_{25}}{2} + \frac{2 \times B_{24} - B_{22} - B_{26}}{4} \quad (10)$$

当  $\alpha_1 > \beta_1$  时, 即垂直方向边缘差值较小, 则垂直方向作为当前点  $B_{24}$  的边缘方向, 选择当前点  $B_{24}$  垂直方向上相邻的绿色分量  $G_{34}$  和蓝色分量  $B_{44}$  以及当前的蓝色分量  $B_{24}$  来计算当前点所缺失的绿色分量  $G_{24}$ , 计算方法如下:

$$G_{24} = G_{34} + \frac{B_{24} - B_{44}}{2} \quad (11)$$

当  $\alpha_1 = \beta_1$  时, 则选择像素点  $B_{24}$  周围三个绿色分量  $G_{23}$ 、 $G_{34}$ 、 $G_{25}$  和三个蓝色分量  $B_{44}$ 、 $B_{26}$ 、 $B_{22}$  以及当前的蓝色分量  $B_{24}$  来计算当前点所缺失的绿色分量  $G_{24}$ , 计算方法如下:

$$G_{24} = \frac{G_{23} + G_{34} + G_{25}}{3} + \frac{3 \times B_{24} - B_{22} - B_{44} - B_{26}}{6} \quad (12)$$

在仅包含红色分量 R 的像素采样点处, 其水平方向的梯度  $\alpha_2$ 、垂直方向的梯度  $\beta_2$  分别由相邻的绿色分量 G 和红色分量 R 计算, 该点处所缺失的绿色分量 G 的计算与在仅包含蓝色分量 B 的像素采样点处计算缺失的绿色分量 G 的插值过程相同。如图 3 中所示, 其水平方向的梯度  $\alpha_2$ 、垂直方向的梯度  $\beta_2$  分别为:

$$\alpha_2 = |2R_y - R_{y(j-1)} - R_{y(j+1)}| + |G_{y(j-1)} - G_{y(j+1)}| \quad (13)$$

$$\beta_2 = |2R_y - R_{(i-2)y} - R_{(i+2)y}| + |G_{(i-1)y} - G_{(i+1)y}| \quad (14)$$

通过比较两个方向梯度的大小关系, 当  $\alpha_2 < \beta_2$  时, 则水平方向作为当前点  $R_y$  的边缘检测参考方向, 选择当前点  $R_y$  水平方向上相邻的两个绿色分量  $G_{y(j-1)}$ 、 $G_{y(j+1)}$  和两个红色分

量  $R_{i(j-2)}$ 、 $R_{i(j+2)}$  以及当前的红色分量  $R_y$  来计算当前点所缺失的绿色分量  $G_y$ ；当  $\alpha_2 > \beta_2$  时，则垂直方向作为当前点  $R_y$  的边缘检测参考方向，选择当前点  $R_y$  垂直方向上相邻的两个绿色分量  $G_{(i-1)y}$ 、 $G_{(i+1)y}$  和两个红色分量  $R_{(i-2)y}$ 、 $R_{(i+2)y}$  以及当前的红色分量  $R_y$  来计算当前点所缺失的绿色分量  $G_y$ 。当  $\alpha_2 = \beta_2$  时，则选择该像素点  $R_y$  周围四个绿色分量  $G_{i(j-1)}$ 、 $G_{i(j+1)}$ 、 $G_{(i-1)y}$ 、 $G_{(i+1)y}$  和四个红色分量  $R_{i(j-2)}$ 、 $R_{i(j+2)}$ 、 $R_{(i-2)y}$ 、 $R_{(i+2)y}$  以及当前的红色分量  $R_y$  来计算当前所缺失的绿色分量  $G_y$ 。其计算公式为：

$$G_y = \begin{cases} \frac{G_{i(j-1)} + G_{i(j+1)}}{2} + \frac{2 \times R_y - R_{i(j-2)} - R_{i(j+2)}}{4} & \alpha_2 < \beta_2 \\ \frac{G_{(i-1)y} + G_{(i+1)y}}{2} + \frac{2 \times R_y - R_{(i-2)y} - R_{(i+2)y}}{4} & \alpha_2 > \beta_2 \\ \frac{G_{(i-1)y} + G_{i(j-1)} + G_{i(j+1)} + G_{(i+1)y}}{4} + \frac{4 \times R_y - R_{(i-2)y} - R_{i(j-2)} - R_{i(j+2)} - R_{(i+2)y}}{8} & \alpha_2 = \beta_2 \end{cases} \quad (15)$$

以图 4 中像素采样点  $R_{33}$  为例，则该点的水平方向的梯度  $\alpha_2$ 、垂直方向的梯度  $\beta_2$  分别为：

$$\alpha_2 = |2R_{33} - R_{31} - R_{35}| + |G_{32} - G_{34}| \quad (16)$$

$$\beta_2 = |2R_{33} - R_{13} - R_{53}| + |G_{23} - G_{43}| \quad (17)$$

通过比较两个方向梯度的大小关系，有：

$$G_{33} = \begin{cases} \frac{G_{32} + G_{34}}{2} + \frac{2 \times R_{33} - R_{31} - R_{35}}{4} & \alpha_2 < \beta_2 \\ \frac{G_{23} + G_{43}}{2} + \frac{2 \times R_{33} - R_{13} - R_{53}}{4} & \alpha_2 > \beta_2 \\ \frac{G_{23} + G_{32} + G_{43} + G_{34}}{4} + \frac{4 \times R_{33} - R_{13} - R_{31} - R_{53} - R_{35}}{8} & \alpha_2 = \beta_2 \end{cases} \quad (18)$$

以特殊像素点  $R_{31}$  为例，计算该点所缺失的绿色分量  $G_{31}$ ，则图像水平方向的梯度  $\alpha_2$ 、垂直方向的梯度  $\beta_2$  分别为：

$$\alpha_2 = |R_{31} - R_{33}| + |G_{32}| \quad (19)$$

$$\beta_2 = |2R_{31} - R_{11} - R_{51}| + |G_{21} - G_{41}| \quad (20)$$

比较以上两个梯度值，选择较小的方向作为当前点的边缘方向。

[0044] 1) 当  $\alpha_2 < \beta_2$  时，即水平方向边缘差值较小，则水平方向作为当前点  $R_{31}$  的边缘方向，选择当前点  $R_{31}$  水平方向上相邻的绿色分量  $G_{32}$  和红色分量  $R_{33}$  以及当前点的红色分量  $R_{31}$  来计算当前点所缺失的绿色分量  $G_{31}$ ，计算方法如下：

$$G_{31} = G_{32} + \frac{R_{31} - R_{33}}{2} \quad (21)$$

2) 当  $\alpha_2 > \beta_2$  时, 即垂直方向边缘差值较小, 则垂直方向作为当前点  $R_{31}$  的边缘方向, 选择当前点  $R_{31}$  垂直方向上相邻的两个绿色分量  $G_{21}$ 、 $G_{41}$  和两个红色分量  $R_{11}$ 、 $R_{51}$  以及当前点  $R_{31}$  的红色分量  $R_{31}$  来计算当前点所缺失的绿色分量  $G_{31}$ , 计算方法如下:

$$G_{31} = \frac{G_{21} - G_{41}}{2} + \frac{2R_{31} - R_{11} - R_{51}}{2} \quad (22)$$

3) 当  $\alpha_2 = \beta_2$  时, 则选择像素点  $R_{31}$  周围三个绿色分量  $G_{21}$ 、 $G_{32}$ 、 $G_{41}$  和三个红色分量  $R_{11}$ 、 $R_{33}$ 、 $R_{51}$  以及当前点的红色分量  $R_{31}$  来计算当前点所缺失的绿色分量  $G_{31}$ , 计算方法如下:

$$G_{31} = \frac{G_{21} + G_{32} + G_{41}}{3} + \frac{3 \times R_{31} - R_{11} - R_{33} - R_{51}}{6} \quad (23)$$

步骤 2. 计算 B 分量上的 R 分量

在包含蓝色分量 B 的像素采样点处, 用具有边缘检测的改进型双线性插值算法计算 R 分量, 利用图像数据的相关特性, 并引入了三角形边缘检测算法, 从水平方向、垂直方向、 $45^\circ$  方向及  $135^\circ$  方向四个方向, 综合考虑当前点邻域的绿色分量 G 及红色分量 R, 进行图像边缘检测。首先计算垂直方向梯度  $\alpha_B$  和水平方向梯度  $b_B$ , 比较  $\alpha_B$ 、 $b_B$  的值, 选择数值较小的方向作为当前像素采样点的边缘参考方向。通过 G 分量修正。

[0045] (1) 当  $\alpha_B < b_B$  时, 则垂直方向作为当前点的边缘方向, 选择当前点垂直方向上相邻的两个绿色分量 G 作为当前像素采样点的边缘检测参考方向点。

[0046] (2) 当  $\alpha_B \geq b_B$  时, 则水平方向作为当前点的边缘方向, 选择当前点水平方向上相邻的两个绿色分量 G 作为当前像素采样点的边缘检测参考方向点。

[0047] 如图 5 所示,  $\alpha_B$ 、 $b_B$  的计算公式如下:

$$\alpha_B = |G_{(i-1)y} - G_{(i+1)y}| + |B_{(i-2)y} - 2B_{iy} + B_{(i+2)y}| \quad (24)$$

$$b_B = |G_{i(j-1)} - G_{i(j+1)}| + |B_{i(j-2)} - 2B_{ij} + B_{i(j+2)}| \quad (25)$$

其次是结合比较  $45^\circ$  方向及  $135^\circ$  方向, 考虑临近同像素分量, 通过绿色分量修正, e、f、g、h 分别代表当前像素点  $B_y$  与邻近上、下、左、右四个方向像素点  $G_{(i-1)y}$ 、 $G_{(i+1)y}$ 、 $G_{i(j-1)}$ 、 $G_{i(j+1)}$  的绿色分量的差值, 引入的阈值 k 的判断可根据图像的不同而调整, 从而使算法能够适应对不同图像的处理要求。k 参数实际控制的是图像中像素之间梯度的支撑范围, 大部分像素点仅仅需要做对角平均, 因此 k 需要选择较大, 而 k 选择较大值会使得公式的计算对于大部分像素只需进行前两个条件的运算, 从而大大降低运算速度, 而像素之间的梯度差, 一般大于 20—30 会让人的视觉感觉有差异, 对于真彩色来说 R/G/B 最大的梯度差理论上 255 最小是 0, 但大部分像素之间的梯度差都会小于 100。在利用梯度做边缘检测的算法预

置都不会太大也是这个原因,否则会漏掉很多边缘。

[0048] 当  $a_B < b_B$  并且  $a_B < k$  时,则  $45^\circ$  方向作为当前点  $B_y$  的边缘方向,选择当前点  $B_y$   $45^\circ$  方向上相邻的两个红色分量  $R_{(i-1)(j-1)}$ 、 $R_{(i+1)(j+1)}$  作为当前像素采样点  $B_y$  的边缘检测参考点。对应的两个绿色分量  $G_{(i-1)(j-1)}$ 、 $G_{(i+1)(j+1)}$  作为修正。

[0049] 当  $a_B \geq b_B$  并且  $b_B < k$  时,则  $135^\circ$  方向作为当前点  $B_y$  的边缘方向,选择当前点  $B_y$   $135^\circ$  方向上相邻的两个红色分量  $R_{(i-1)(j+1)}$ 、 $R_{(i+1)(j-1)}$  作为当前像素采样点  $B_y$  的边缘检测参考点。对应的两个绿色分量  $G_{(i-1)(j+1)}$ 、 $G_{(i+1)(j-1)}$  作为修正。

[0050] 当  $a_B \geq b_B$  并且  $k \leq b_B$ 、 $e < f$  时,则选择当前蓝色像素点  $B_y$  邻近的向上方向的绿色像素点  $G_{(i-1)j}$  作为计算红色分量的参考点,通过该点  $G_{(i-1)j}$  邻近的两个红色分量  $R_{(i-1)(j-1)}$ 、 $R_{(i-1)(j+1)}$  计算缺失的红色分量  $R_y$ 。对应的两个绿色分量  $G_{(i-1)(j-1)}$ 、 $G_{(i-1)(j+1)}$  的作为修正。

[0051] 当  $a_B \geq b_B$  并且  $k \leq b_B$ 、 $e \geq f$  时,则选择当前蓝色像素点  $B_y$  邻近的向下方向的绿色像素点  $G_{(i+1)j}$  作为计算红色分量的参考点,通过该点  $G_{(i+1)j}$  邻近的两个红色分量  $R_{(i+1)(j-1)}$ 、 $R_{(i+1)(j+1)}$  计算缺失的红色分量  $R_y$ 。对应的两个绿色分量  $G_{(i+1)(j-1)}$ 、 $G_{(i+1)(j+1)}$  的作为修正。

[0052] 当  $a_B < b_B$  并且  $k \leq a_B$ 、 $g < h$  时,则选择当前蓝色像素点  $B_y$  邻近的向左方向的绿色像素点  $G_{i(j-1)}$  作为计算红色分量的参考点,通过该点  $G_{i(j-1)}$  邻近的两个红色分量  $R_{(i-1)(j-1)}$ 、 $R_{(i+1)(j-1)}$  计算缺失的红色分量  $R_y$ 。对应的两个绿色分量  $G_{(i-1)(j-1)}$ 、 $G_{(i+1)(j-1)}$  的作为修正。

[0053] 当  $a_B < b_B$  并且  $k \leq a_B$ 、 $g \geq h$  时,则选择当前蓝色像素点  $B_y$  邻近的向右方向的绿色像素点  $G_{i(j+1)}$  作为计算红色分量的参考点,通过该点  $G_{i(j+1)}$  邻近的两个红色分量  $R_{(i-1)(j+1)}$ 、 $R_{(i+1)(j+1)}$  计算缺失的红色分量  $R_y$ 。对应的两个绿色分量  $G_{(i-1)(j+1)}$ 、 $G_{(i+1)(j+1)}$  的作为修正。

[0054] 其计算公式如下:

$$R_y = \begin{cases} \frac{R_{(i-1)(j-1)} + R_{(i+1)(j+1)}}{2} + G_y - \frac{G_{(i-1)(j-1)} + G_{(i+1)(j+1)}}{2} & a_B < b_B \ \& \ a_B < k \\ \frac{R_{(i+1)(j-1)} + R_{(i-1)(j+1)}}{2} + G_y - \frac{G_{(i+1)(j-1)} + G_{(i-1)(j+1)}}{2} & a_B \geq b_B \ \& \ b_B < k \\ \frac{R_{(i-1)(j-1)} + R_{(i+1)(j-1)}}{2} + G_y - \frac{G_{(i-1)(j-1)} + G_{(i+1)(j-1)}}{2} & a_B < b_B \ \& \ k \leq a_B \ \& \ g < h \\ \frac{R_{(i-1)(j+1)} + R_{(i+1)(j+1)}}{2} + G_y - \frac{G_{(i-1)(j+1)} + G_{(i+1)(j+1)}}{2} & a_B < b_B \ \& \ k \leq a_B \ \& \ g \geq h \\ \frac{R_{(i-1)(j-1)} + R_{(i-1)(j+1)}}{2} + G_y - \frac{G_{(i-1)(j-1)} + G_{(i-1)(j+1)}}{2} & a_B \geq b_B \ \& \ k \leq b_B \ \& \ e < f \\ \frac{R_{(i+1)(j-1)} + R_{(i+1)(j+1)}}{2} + G_y - \frac{G_{(i+1)(j-1)} + G_{(i+1)(j+1)}}{2} & a_B \geq b_B \ \& \ k \leq b_B \ \& \ e \geq f \end{cases} \quad (26)$$

$$\text{其中: } e = |G_{(i-1)j} - G_y| \quad (27)$$

$$f = |G_{(i+1)j} - G_y| \quad (28)$$

$$g = |G_{i(j-1)} - G_y| \quad (29)$$

$$h = |G_{i(j+1)} - G_y| \quad (30)$$

对于 G 分量上的 R 分量的计算,如图 5 中所示,  $G_{(i-1)j}$  分量上  $R_{(i-1)j}$  分量的计算,考虑邻近的 R 分量  $R_{(i-1)(j-1)}$ 、 $R_{(i-1)(j+1)}$ ,通过 G 分量  $G_{(i-1)j}$ 、 $G_{(i-1)(j-1)}$ 、 $G_{(i-1)(j+1)}$  修正,  $G_{i(j-1)}$  分量上  $R_{i(j-1)}$  分量的计算,考虑邻近的 R 分量  $R_{(i-1)(j-1)}$ 、 $R_{(i+1)(j-1)}$ ,通过 G 分量  $G_{i(j-1)}$ 、 $G_{(i-1)(j-1)}$ 、 $G_{(i+1)(j-1)}$  修正。其计算公式如下:

$$R_{(i-1)j} = \frac{R_{(i-1)(j-1)} + R_{(i-1)(j+1)}}{2} + G_{(i-1)j} - \frac{G_{(i-1)(j-1)} + G_{(i-1)(j+1)}}{2} \quad (31)$$

$$R_{i(j-1)} = \frac{R_{(i-1)(j-1)} + R_{(i+1)(j-1)}}{2} + G_{i(j-1)} - \frac{G_{(i-1)(j-1)} + G_{(i+1)(j-1)}}{2} \quad (32)$$

以图 6 中的  $B_{44}$  为例,则在该像素点计算缺失的红色分量  $R_{44}$ ,  $a_B$ 、 $b_B$  计算公式为:

$$a_B = |G_{34} - G_{54}| + |B_{24} - 2B_{44} + B_{64}| \quad (33)$$

$$b_B = |G_{43} - G_{45}| + |B_{42} - 2B_{44} + B_{46}| \quad (34)$$

其次是结合比较  $45^\circ$  方向及  $135^\circ$  方向,考虑邻近同像素分量,通过绿色分量修正, e、f、g、h 分别代表当前像素点  $B_{44}$  与邻近上、下、左、右四个方向像素点  $G_{34}$ 、 $G_{54}$ 、 $G_{43}$ 、 $G_{45}$  的绿色分量的差值,同样引入阈值 k,

当  $a_B < b_B$  并且  $a_B < k$  时,则  $45^\circ$  方向作为当前点  $B_{44}$  的边缘方向,选择当前点  $B_{44}$   $45^\circ$  方向上相邻的两个红色分量  $R_{33}$ 、 $R_{55}$  作为当前像素采样点  $B_{44}$  的边缘检测参考点。对应的两个绿色分量  $G_{33}$ 、 $G_{55}$  作为修正。

[0055] 当  $a_B \geq b_B$  并且  $b_B < k$  时,则  $135^\circ$  方向作为当前点  $B_{44}$  的边缘方向,选择当前点  $B_{44}$   $135^\circ$  方向上相邻的两个红色分量  $R_{35}$ 、 $R_{53}$  作为当前像素采样点  $B_{44}$  的边缘检测参考点。对应的两个绿色分量  $G_{35}$ 、 $G_{53}$  作为修正。

[0056] 当  $a_B \geq b_B$  并且  $k \leq b_B$ 、 $e < f$  时,则选择当前蓝色像素点  $B_{44}$  邻近的向上方向的绿色像素点  $G_{34}$  作为计算红色分量的参考点,通过该点  $G_{34}$  邻近的两个红色分量  $R_{33}$ 、 $R_{55}$  计算缺失的红色分量  $R_{44}$ 。通过对应的两个绿色分量  $G_{33}$ 、 $G_{55}$  修正。

[0057] 当  $a_B \geq b_B$  并且  $k \leq b_B$ 、 $e \geq f$  时,则选择当前蓝色像素点  $B_{44}$  邻近的向下方向的绿色像素点  $G_{54}$  作为计算红色分量的参考点,通过该点  $G_{54}$  邻近的两个红色分量  $R_{53}$ 、 $R_{55}$  计算

缺失的红色分量  $R_{44}$ 。通过对应的两个绿色分量  $G_{33}$ 、 $G_{35}$  修正。

[0058] 当  $a_B < b_B$  并且  $k \leq a_B$ 、 $g < h$  时,则选择当前蓝色像素点  $B_{44}$  邻近的向左方向的绿色像素点  $G_{43}$  作为计算红色分量的参考点,通过该点  $G_{43}$  邻近的两个红色分量  $R_{33}$ 、 $R_{53}$  计算缺失的红色分量  $R_{44}$ 。通过对应的两个绿色分量  $G_{33}$ 、 $G_{35}$  修正。

[0059] 当  $a_B < b_B$  并且  $k \leq a_B$ 、 $g \geq h$  时,则选择当前蓝色像素点  $B_{44}$  邻近的向右方向的绿色像素点  $G_{45}$  作为计算红色分量的参考点,通过该点  $G_{45}$  邻近的两个红色分量  $R_{35}$ 、 $R_{55}$  计算缺失的红色分量  $R_{44}$ 。通过对应的两个绿色分量  $G_{35}$ 、 $G_{55}$  修正。

[0060] 其计算公式如下:

$$R_{44} = \begin{cases} \frac{R_{33} + R_{55}}{2} + G_{44} - \frac{G_{33} + G_{55}}{2} & a_B < b_B \ \& \ a_B < k \\ \frac{R_{53} + R_{35}}{2} + G_{44} - \frac{G_{53} + G_{35}}{2} & a_B \geq b_B \ \& \ b_B < k \\ \frac{R_{33} + R_{53}}{2} + G_{44} - \frac{G_{33} + G_{53}}{2} & a_B < b_B \ \& \ k \leq a_B \ \& \ g < h \\ \frac{R_{35} + R_{55}}{2} + G_{44} - \frac{G_{35} + G_{55}}{2} & a_B < b_B \ \& \ k \leq a_B \ \& \ g \geq h \\ \frac{R_{53} + R_{35}}{2} + G_{44} - \frac{G_{33} + G_{35}}{2} & a_B \geq b_B \ \& \ k \leq b_B \ \& \ e < f \\ \frac{R_{53} + R_{55}}{2} + G_{44} - \frac{G_{53} + G_{55}}{2} & a_B \geq b_B \ \& \ k \leq b_B \ \& \ e \geq f \end{cases} \quad (35)$$

$$\text{其中: } e = |G_{34} - G_{44}| \quad (36)$$

$$f = |G_{54} - G_{44}| \quad (37)$$

$$g = |G_{43} - G_{44}| \quad (38)$$

$$h = |G_{45} - G_{44}| \quad (39)$$

$G_{34}$  分量上  $R_{34}$  分量的计算,考虑邻近的 R 分量  $R_{33}$ 、 $R_{35}$ ,通过 G 分量  $G_{34}$ 、 $G_{33}$ 、 $G_{35}$  修正,  
 $G_{43}$  分量上  $R_{43}$  分量的计算,考虑邻近的 R 分量  $R_{33}$ 、 $R_{53}$ ,通过 G 分量  $G_{43}$ 、 $G_{33}$ 、 $G_{53}$  修正。计算公式为:

$$R_{34} = \frac{R_{33} + R_{35}}{2} + G_{34} - \frac{G_{33} + G_{35}}{2} \quad (40)$$

$$R_{43} = \frac{R_{33} + R_{53}}{2} + G_{43} - \frac{G_{33} + G_{53}}{2} \quad (41)$$

步骤 3. 计算 R 分量上的 B 分量

在包含红色分量 R 的像素采样点处,用具有边缘检测的改进型双线性插值算法计算 B 分量,利用图像数据的相关特性,并引入了三角形边缘检测算法,从水平方向、垂直方向、



45° 方向及 135° 方向四个方向,综合考虑当前点邻域的绿色分量 G 及蓝色分量 B,进行图像边缘检测。计算垂直方向梯度  $a_x$  和水平方向梯度  $b_x$ ,首先比较  $a_x$ 、 $b_x$  的值,选择数值较小的方向作为当前像素采样点的边缘参考方向。通过 G 分量修正。

[0061] (1) 当  $a_x < b_x$  时,则垂直方向作为当前点的边缘方向,选择当前点垂直方向上相邻的两个绿色分量 G 作为当前像素采样点的边缘检测参考方向点。

[0062] (2) 当  $a_x \geq b_x$  时,则水平方向作为当前点的边缘方向,选择当前点水平方向上相邻的两个绿色分量 G 作为当前像素采样点的边缘检测参考方向点。

[0063] 如图 7 所示,  $a_x$ 、 $b_x$  计算公式如下:

$$a_x = |G_{(i-1)j} - G_{(i+1)j}| + |-R_{(i-2)j} + 2R_{ij} - R_{(i+2)j}| \quad (42)$$

$$b_x = |G_{i(j-1)} - G_{i(j+1)}| + |-R_{i(j-2)} + 2R_{ij} - R_{i(j+2)}| \quad (43)$$

其次是结合比较 45° 方向及 145° 方向,考虑邻近同像素分量,e、f、g、h 分别代表当前像素点  $R_y$  与邻近上、下、左、右四个方向  $G_{(i-1)j}$ 、 $G_{(i+1)j}$ 、 $G_{i(j-1)}$ 、 $G_{i(j+1)}$  的绿色分量的差值,同样,引入的阈值 k。

[0064] 当  $a_x < b_x$  并且  $a_x < k$  时,则 45° 方向作为当前点  $R_y$  的边缘方向,选择当前点  $R_y$  45° 方向上相邻的蓝色分量  $B_{(i-1)(j-1)}$ 、 $B_{(i+1)(j+1)}$  作为当前像素采样点  $R_y$  的边缘检测参考点。对应的两个绿色分量  $G_{(i-1)(j-1)}$ 、 $G_{(i+1)(j+1)}$  作为修正。

[0065] 当  $a_x \geq b_x$  并且  $b_x < k$  时,则 135° 方向作为当前点  $R_y$  的边缘方向,选择当前点  $R_y$  135° 方向上相邻的蓝色分量  $B_{(i+1)(j-1)}$ 、 $B_{(i-1)(j+1)}$  作为当前像素采样点  $R_y$  的边缘检测参考点。对应的两个绿色分量  $G_{(i+1)(j-1)}$ 、 $G_{(i-1)(j+1)}$  作为修正。

[0066] 当  $a_x \geq b_x$  并且  $k \leq b_x$ 、 $e < f$  时,则选择当前红色像素点  $R_y$  邻近的向上方向的绿色像素点  $G_{(i-1)j}$  作为计算蓝色分量的参考点,通过该点  $G_{(i-1)j}$  邻近的两个蓝色分量  $B_{(i-1)(j-1)}$ 、 $B_{(i-1)(j+1)}$  计算缺失的蓝色分量  $B_y$ 。对应的两个绿色分量  $G_{(i-1)(j-1)}$ 、 $G_{(i-1)(j+1)}$  作为修正。

[0067] 当  $a_x \geq b_x$  并且  $k \leq b_x$ 、 $e \geq f$  时,则选择当前红色像素点  $R_y$  邻近的向下方向的绿色像素点  $G_{(i+1)j}$  作为计算蓝色分量的参考点,通过该点  $G_{(i+1)j}$  邻近的两个蓝色分量  $B_{(i+1)(j-1)}$ 、 $B_{(i+1)(j+1)}$  计算缺失的蓝色分量  $B_y$ 。对应的两个绿色分量  $G_{(i+1)(j-1)}$ 、 $G_{(i+1)(j+1)}$  作为修正。

[0068] 当  $a_x < b_x$  并且  $k \leq a_x$ 、 $g < h$  时,则选择当前红色像素点  $R_y$  邻近的向左方向的绿色像素点  $G_{i(j-1)}$  作为计算蓝色分量的参考点,通过该点  $G_{i(j-1)}$  邻近的两个蓝色分量  $B_{(i-1)(j-1)}$ 、 $B_{(i+1)(j-1)}$  计算缺失的蓝色分量  $B_y$ 。对应的两个绿色分量  $G_{(i-1)(j-1)}$ 、 $G_{(i+1)(j-1)}$  作为修正。

[0069] 当  $a_x < b_x$  并且  $k \leq a_x$ 、 $g \geq h$  时,则选择当前红色像素点  $R_y$  邻近的向右方向的绿

色像素点  $G_{(i,j+1)}$  作为计算蓝色分量的参考点,通过该点  $G_{(i,j+1)}$  邻近的两个蓝色分量  $B_{(i-1X,j+1)}$ 、 $B_{(i+1X,j+1)}$  计算缺失的蓝色分量  $B_{ij}$ 。对应的两个绿色分量  $G_{(i-1X,j+1)}$ 、 $G_{(i+1X,j+1)}$  作为修正。

[0070] 其计算公式如下：

$$B_{ij} = \begin{cases} \frac{B_{(i-1X,j-1)} + B_{(i+1X,j+1)}}{2} + G_{ij} - \frac{G_{(i-1X,j-1)} + G_{(i+1X,j+1)}}{2} & a_R < b_R \ \& \ a_R < k \\ \frac{B_{(i+1X,j-1)} + B_{(i-1X,j+1)}}{2} + G_{ij} - \frac{G_{(i+1X,j-1)} + G_{(i-1X,j+1)}}{2} & a_R \geq b_R \ \& \ b_R < k \\ \frac{B_{(i-1X,j-1)} + B_{(i+1X,j-1)}}{2} + G_{ij} - \frac{G_{(i-1X,j-1)} + G_{(i+1X,j-1)}}{2} & a_R < b_R \ \& \ k \leq a_R \ \& \ g < h \\ \frac{B_{(i-1X,j+1)} + B_{(i+1X,j+1)}}{2} + G_{ij} - \frac{G_{(i-1X,j+1)} + G_{(i+1X,j+1)}}{2} & a_R < b_R \ \& \ k \leq a_R \ \& \ g \geq h \\ \frac{B_{(i-1X,j-1)} + B_{(i-1X,j+1)}}{2} + G_{ij} - \frac{G_{(i-1X,j-1)} + G_{(i-1X,j+1)}}{2} & a_R \geq b_R \ \& \ k \leq b_R \ \& \ e < f \\ \frac{B_{(i+1X,j-1)} + B_{(i+1X,j+1)}}{2} + G_{ij} - \frac{G_{(i+1X,j-1)} + G_{(i+1X,j+1)}}{2} & a_R \geq b_R \ \& \ k \leq b_R \ \& \ e \geq f \end{cases} \quad (44)$$

$$\text{其中：} \ e = |G_{(i-1)} - G_{ij}| \quad (45)$$

$$f = |G_{(i+1)j} - G_{ij}| \quad (46)$$

$$g = |G_{i(j-1)} - G_{ij}| \quad (47)$$

$$h = |G_{i(j+1)} - G_{ij}| \quad (48)$$

对于G分量上的B分量的计算,如图7中所示,  $G_{(i-1)j}$  分量上  $B_{(i-1)j}$  分量的计算,考虑邻近的B分量  $B_{(i-1X,j-1)}$ 、 $B_{(i-1X,j+1)}$ ,通过G分量  $G_{(i-1)j}$ 、 $G_{(i-1X,j-1)}$ 、 $G_{(i-1X,j+1)}$  修正,  $G_{i(j-1)}$  分量上  $B_{i(j-1)}$  分量的计算,考虑邻近的B分量  $B_{(i-1X,j-1)}$ 、 $B_{(i+1X,j-1)}$ ,通过G分量  $G_{i(j-1)}$ 、 $G_{(i-1X,j-1)}$ 、 $G_{(i+1X,j-1)}$  修正。其计算公式如下：

$$B_{(i-1)j} = \frac{B_{(i-1X,j-1)} + B_{(i-1X,j+1)}}{2} + G_{(i-1)j} - \frac{G_{(i-1X,j-1)} + G_{(i-1X,j+1)}}{2} \quad (49)$$

$$B_{i(j-1)} = \frac{B_{(i-1X,j-1)} + B_{(i+1X,j-1)}}{2} + G_{i(j-1)} - \frac{G_{(i-1X,j-1)} + G_{(i+1X,j-1)}}{2} \quad (50)$$

以图8中的  $R_{33}$  为例,则在该像素点计算缺失的蓝色分量  $B_{33}$ ,  $a_R$ 、 $b_R$  计算公式为：

$$a_R = |G_{23} - G_{43}| + |R_{13} - 2R_{33} + R_{53}| \quad (51)$$

$$b_R = |G_{32} - G_{34}| + |R_{31} - 2R_{33} + R_{35}| \quad (52)$$

其次是结合比较  $45^\circ$  方向及  $135^\circ$  方向,考虑邻近同像素分量,e、f、g、h 分别代表当前像素点  $R_{33}$  与邻近上、下、左、右四个方向  $G_{23}$ 、 $G_{43}$ 、 $G_{32}$ 、 $G_{34}$  的绿色分量的差值,同样,引入

的阈值  $k$ 。

[0071] 当  $a_R < b_R$  并且  $a_R < k$  时, 则  $45^\circ$  方向作为当前点  $R_{33}$  的边缘方向, 选择当前点  $R_{33}$   $45^\circ$  方向上相邻的蓝色分量  $B_{22}$ 、 $B_{44}$  作为当前像素采样点  $R_{33}$  的边缘检测参考点。对应的两个绿色分量  $G_{22}$ 、 $G_{44}$  作为修正。

[0072] 当  $a_R \geq b_R$  并且  $b_R < k$  时, 则  $135^\circ$  方向作为当前点  $R_{33}$  的边缘方向, 选择当前点  $R_{33}$   $135^\circ$  方向上相邻的蓝色分量  $B_{42}$ 、 $B_{24}$  作为当前像素采样点  $R_{33}$  的边缘检测参考点。对应的两个绿色分量  $G_{42}$ 、 $G_{24}$  作为修正。

[0073] 当  $a_R \geq b_R$  并且  $k \leq b_R$ 、 $e < f$  时, 则选择当前红色像素点  $R_{33}$  邻近的向上方向的绿色像素点  $G_{33}$  作为计算蓝色分量的参考点, 通过该点  $G_{33}$  邻近的两个蓝色分量  $B_{22}$ 、 $B_{24}$  计算缺失的蓝色分量  $B_{33}$ 。对应的两个绿色分量  $G_{22}$ 、 $G_{24}$  作为修正。

[0074] 当  $a_R \geq b_R$  并且  $k \leq b_R$ 、 $e \geq f$  时, 则选择当前红色像素点  $R_{33}$  邻近的向下方向的绿色像素点  $G_{43}$  作为计算蓝色分量的参考点, 通过该点  $G_{43}$  邻近的两个蓝色分量  $B_{42}$ 、 $B_{44}$  计算缺失的蓝色分量  $B_{33}$ 。对应的两个绿色分量  $G_{42}$ 、 $G_{44}$  作为修正。

[0075] 当  $a_R < b_R$  并且  $k \leq a_R$ 、 $g < h$  时, 则选择当前红色像素点  $R_{33}$  邻近的向左方向的绿色像素点  $G_{32}$  作为计算蓝色分量的参考点, 通过该点  $G_{32}$  邻近的两个蓝色分量  $B_{22}$ 、 $B_{42}$  计算缺失的蓝色分量  $B_{33}$ 。对应的两个绿色分量  $G_{22}$ 、 $G_{42}$  作为修正。

[0076] 当  $a_R < b_R$  并且  $k \leq a_R$ 、 $g \geq h$  时, 则选择当前红色像素点  $R_{33}$  邻近的向右方向的绿色像素点  $G_{34}$  作为计算蓝色分量的参考点, 通过该点  $G_{34}$  邻近的两个蓝色分量  $B_{24}$ 、 $B_{44}$  计算缺失的蓝色分量  $B_{33}$ 。对应的两个绿色分量  $G_{24}$ 、 $G_{44}$  作为修正。

[0077] 其计算公式如下:

$$B_{33} = \begin{cases} \frac{B_{22} + B_{44}}{2} + G_{33} - \frac{G_{22} + G_{44}}{2} & a_R < b_R \ \& \ a_R < k \\ \frac{B_{42} + B_{24}}{2} + G_{33} - \frac{G_{42} + G_{24}}{2} & a_R \geq b_R \ \& \ b_R < k \\ \frac{B_{22} + B_{42}}{2} + G_{33} - \frac{G_{22} + G_{42}}{2} & a_R < b_R \ \& \ k \leq a_R \ \& \ g < h \\ \frac{B_{24} + B_{44}}{2} + G_{33} - \frac{G_{24} + G_{44}}{2} & a_R < b_R \ \& \ k \leq a_R \ \& \ g \geq h \\ \frac{B_{22} + B_{24}}{2} + G_{33} - \frac{G_{22} + G_{24}}{2} & a_R \geq b_R \ \& \ k \leq b_R \ \& \ e < f \\ \frac{B_{42} + B_{44}}{2} + G_{33} - \frac{G_{42} + G_{44}}{2} & a_R \geq b_R \ \& \ k \leq b_R \ \& \ e \geq f \end{cases} \quad (53)$$

$$\text{其中: } e = |G_{23} - G_{33}| \quad (54)$$

$$f = |G_{43} - G_{33}| \quad (55)$$

$$g = |G_{32} - G_{33}| \quad (56)$$

$$h = |G_{34} - G_{33}| \quad (57)$$

$G_{23}$  分量上  $B_{23}$  分量的计算, 考虑邻近的蓝色分量  $B_{22}$ 、 $B_{24}$ , 通过 G 分量  $G_{22}$ 、 $G_{23}$ 、 $G_{24}$  修正,  $G_{32}$  分量上  $B_{32}$  分量的计算, 考虑邻近的蓝色分量  $B_{22}$ 、 $B_{42}$ , 通过 G 分量  $G_{22}$ 、 $G_{32}$ 、 $G_{42}$  修正。计算公式为:

$$B_{23} = \frac{B_{22} + B_{24}}{2} + G_{23} - \frac{G_{22} + G_{24}}{2} \quad (58)$$

$$B_{32} = \frac{B_{22} + B_{42}}{2} + G_{32} - \frac{G_{22} + G_{42}}{2} \quad (59)$$

通过上述步骤, 全分辨率的 R、G、B 分量全部产生。

$B$	$G$	$B_{(i-2)j}$	$G$	$B$
$G$	$R$	$G_{(i-1)j}$	$R$	$G$
$B_{i(j-2)}$	$G_{i(j-1)}$	$B_{ij}$	$G_{i(j+1)}$	$B_{i(j+2)}$
$G$	$R$	$G_{(i+1)j}$	$R$	$G$
$B$	$G$	$B_{(i+2)j}$	$G$	$B$

图 1

$B_{22}$	$G_{23}$	$B_{24}$	$G_{25}$	$B_{26}$
$G$	$R$	$G_{34}$	$R$	$G$
$B_{42}$	$G_{43}$	$B_{44}$	$G_{45}$	$B_{46}$
$G$	$R$	$G_{54}$	$R$	$G$
$B$	$G$	$B_{64}$	$G$	$B$

图 2

$R$	$G$	$R_{(i-2)j}$	$G$	$R$
$G$	$B_{(i-1)(j-1)}$	$G_{(i-1)j}$	$B_{(i-1)(j+1)}$	$G$
$R_{i(j-2)}$	$G_{i(j-1)}$	$R_{ij}$	$G_{i(j+1)}$	$R_{i(j+2)}$
$G$	$B_{(i+1)(j-1)}$	$G_{(i+1)j}$	$B_{(i+1)(j+1)}$	$G$
$R$	$G$	$R_{(i+2)j}$	$G$	$R$

图 3

$R_{11}$	$G$	$R_{13}$	$G$	$R_{15}$
$G_{21}$	$B_{22}$	$G_{23}$	$B_{24}$	$G$
$R_{31}$	$G_{32}$	$R_{33}$	$G_{34}$	$R_{35}$
$G_{41}$	$B_{42}$	$G_{43}$	$B_{44}$	$G$
$R_{51}$	$G$	$R_{53}$	$G$	$R_{55}$

图 4

$B$	$G$	$B_{(i-2)j}$	$G$	$B$
$G$	$R_{(i-1)(j-1)}$	$G_{(i-1)j}$	$R_{(i-1)(j+1)}$	$G$
$B_{i(j-2)}$	$G_{i(j-1)}$	$B_{ij}$	$G_{i(j+1)}$	$B_{i(j+2)}$
$G$	$R_{(i+1)(j-1)}$	$G_{(i+1)j}$	$R_{(i+1)(j+1)}$	$G$
$B$	$G$	$B_{(i+2)j}$	$G$	$B$

图 5

$B$	$G$	$B_{24}$	$G$	$B$
$G$	$R_{33}$	$G_{34}$	$R_{35}$	$G$
$B_{42}$	$G_{43}$	$B_{44}$	$G_{45}$	$B_{46}$
$G$	$R_{53}$	$G_{54}$	$R_{55}$	$G$
$B$	$G$	$B_{64}$	$G$	$B$

图 6

$R$	$G$	$R_{(i-2)j}$	$G$	$R$
$G$	$B_{(i-1)(j-1)}$	$G_{(i-1)j}$	$B_{(i-1)(j+1)}$	$G$
$R_{i(j-2)}$	$G_{i(j-1)}$	$R_{ij}$	$G_{i(j+1)}$	$R_{i(j+2)}$
$G$	$B_{(i+1)(j-1)}$	$G_{(i+1)j}$	$B_{(i+1)(j+1)}$	$G$
$R$	$G$	$R_{(i+2)j}$	$G$	$R$

图 7

$R$	$G$	$R_{13}$	$G$	$R$
$G$	$B_{22}$	$G_{23}$	$B_{24}$	$G$
$R_{31}$	$G_{32}$	$R_{33}$	$G_{34}$	$R_{35}$
$G$	$B_{42}$	$G_{43}$	$B_{44}$	$G$
$R$	$G$	$R_{53}$	$G$	$R$

图 8