

BEIER TUXIANG CHAZHI HE
YASUO SUANFA
YUANLI JI YINGYONG

贝尔图像插值和压缩算法 原理及应用

程永强 谢克明 著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

贝尔图像插值和压缩算法

原理及应用

程永强 谢克明 著



机械工业出版社

本书在系统地介绍基于贝尔模板图像传感器的图像处理基本知识和理论的基础上,结合当前最新研究成果,系统地介绍了作者的研究成果,详细描述了基于贝尔模板图像传感器的图像处理算法及相关开发应用技术,力求向读者展示最新研究状况和热点问题,希望能进一步推动相关研究的发展。

本书可作为信号处理、计算机等专业的硕士研究生和博士研究生专业教材,也可作为从事图像处理、数码照相和摄像研究开发的科技人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

贝尔图像插值和压缩算法原理及应用/程永强,谢克明著. —北京:机械工业出版社,2010.5

ISBN 978-7-111-30457-9

I. ①贝… II. ①程…②谢… III. ①图像处理-研究 IV. ①TN911.73

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第070905号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:顾谦 责任编辑:顾谦

版式设计:霍永明 责任校对:刘志文

封面设计:路恩中 责任印制:杨曦

北京蓝海印刷有限公司印刷

2010年6月第1版第1次印刷

169mm×239mm·8.75印张·169千字

0001—3000册

标准书号:ISBN 978-7-111-30457-9

定价:28.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010)68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010)88379649

封面无防伪标均为盗版

读者服务部:(010)68993821

前 言

近年来,随着贝尔模板图像传感器在各类数字成像设备中的广泛应用,与之相关的图像处理技术及应用迅速发展成为一个重要的研究领域。目前,彩色图像重构算法和贝尔图像编码算法是该领域内的重点研究内容。从理论和实际应用的角度来看,国内、外学者都作了广泛深入的研究,但尚未出现系统地介绍该领域内研究成果的专著。本书在系统地介绍基于贝尔模板图像传感器的图像处理基本知识和理论的基础上,结合当前最新研究成果,系统地介绍了作者的研究成果,力求向读者展示最新研究状况和热点问题,并希望进行深入交流。

本书在贝尔图像的时频分析基础上研究了彩色图像重构算法和贝尔图像压缩算法之间的联系,提出了新的贝尔图像编码方法及其相应的图像重构算法,并对部分成果进行了开发应用。本书主要内容如下:

以国际标准 JPEG-LS 的框架为基础,提出了基于因果插值的贝尔模板图像无损编码器,对预测器进行了改进,给出了两种可选择的方案,具有较好的去相关性能。为提高编码增益,重新优化了上下文量化区间。所设计的编码器能按照光栅顺序逐点地实现对贝尔模板图像编码,在低复杂度和压缩率之间取得了较好的平衡。该算法可作为自然灰度图像国际编码标准 JPEG-LS 的扩充。

为进一步提高贝尔模板图像压缩率,本书提出了基于小波子带替换的贝尔图像视觉无损压缩方法。采用预测差分法无损压缩贝尔图像绿色分量,用于有效地保护贝尔图像原始亮度信息,并应用简单的线性插值方法估计红、蓝分量位置的绿色值,分别对红、蓝分量及其同位置的绿色估计分量进行了小波变换,进而得到红绿、蓝绿低频子带色差信号,通过低复杂度的 JPEG-LS 进行无损或近无损编码。在编码端,红、蓝分量高频子带被丢弃而不参与编码。在解码端,先解码无损绿色分量,再估计在红、蓝位置的绿色分量,其高频子带可近似替代编码端丢弃的红、蓝分量高频子带,最后反变换得到红、蓝分量的解码值。

本书应用 LPA-ICI (局部多项式近似-置信区间交叉) 方法构造了二阶非线性自适应滤波器,在对贝尔模板图像进行降噪插值的基础上,提出了迭代滤波法进行色差信号后处理的方法,通过迭代滤波可以有效地去除线性插值在估计红、蓝像素时产生的边缘伪彩噪声。针对包含编码噪声的贝尔模板图像,该方法有效

地提高了重构图像质量。

本书还完成了高分辨率的视频展台摄像头设计。其中，采用 FPGA（现场可编程逻辑门阵列）实现了本书提出的贝尔模板无损编码器，可以替代基于 JPEG/JPEG2000 的贝尔模板图像无损编码方案，并集成自动聚焦和自动光圈控制模块，提高了产品性能。

本书中的数据和资料来源于作者研究小组及国内、外同行的研究论文，在参考文献中已注明所引用的研究成果。谢克明教授亲自编写了本书的第 2 章、3.1 节和 4.2 节，并仔细审阅了全书，本书其余章节由程永强副教授编写。

本书可作为信号处理、计算机等专业的硕士研究生和博士研究生专业教材，也可作为从事图像处理、数码照相和摄像研究开发的科技人员的参考书。

由于我们的知识有限、经验不足，书中错误之处在所难免，恳请广大读者批评指正。

作 者

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 图像传感器基本知识	1
1.1.1 图像传感器工作原理	1
1.1.2 彩色滤波阵列	2
1.1.3 彩色图像成像处理流程	5
1.2 贝尔模板图像压缩的研究现状	7
1.2.1 常见的图像压缩方法	7
1.2.2 贝尔图像压缩研究现状	9
1.2.3 存在问题	11
1.3 插值算法的研究现状	11
1.4 标准图像集	14
1.5 本书主要内容和研究成果	14
参考文献	15
第 2 章 贝尔模板 CFA 图像的时频特性	19
2.1 贝尔模板图像的视觉机理	19
2.2 贝尔模板图像的时域和频域特性	20
2.2.1 贝尔模板 CFA 图像模型	20
2.2.2 CFA 图像的色差表示	21
2.2.3 CFA 图像的分量频域分析	22
2.3 贝尔模板图像小波分析	25
2.4 贝尔模板图像压缩方法与 CFA 插值算法之间的关系	27
2.4.1 JPEG2000 编码器简介	27
2.4.2 压缩率与重构图像 PSNR 之间的关系	28
2.4.3 率失真性能分析	30
2.5 小结	30
参考文献	30

第3章 贝尔模板图像的低复杂度无损压缩算法	32
3.1 JPEG-LS 编码标准算法	32
3.2 贝尔模板图像的 One-pass 无损编码器研究	35
3.2.1 因果插值法	36
3.2.2 固定预测器设计	39
3.2.3 梯度上下文优化	44
3.2.4 游长编码	45
3.3 算术编码	45
3.3.1 AACPE 算法描述	46
3.3.2 算法改进	47
3.4 预测误差的算术编码	49
3.5 实验	51
3.6 小结	53
参考文献	54
第4章 基于小波子带替换的贝尔图像视觉无损压缩	56
4.1 贝尔图像视觉无损压缩算法原理	56
4.2 小波选择	60
4.2.1 基于样条函数构造 bior3.5 双正交小波	61
4.2.2 bior3.5 双正交小波的整数提升格式	65
4.3 贝尔图像的 bior3.5 小波变换研究	70
4.3.1 全彩图像的贝尔模板采样	70
4.3.2 不同采样位置下贝尔图像的 bior3.5 小波变换	70
4.4 贝尔分量图像的同位置异分量插值	74
4.5 贝尔图像绿色分量的无损压缩	75
4.5.1 预测器	75
4.5.2 基于拉普拉斯分布的熵编码方法	76
4.6 贝尔图像红、蓝分量的小波低频子带压缩	78
4.7 编解码器的工作步骤	79
4.8 实验	81
4.9 小结	86
参考文献	86
第5章 抑制编码噪声的滤波插值法研究	88
5.1 滤波插值算法原理	88
5.1.1 方向插值	89
5.1.2 色分量的和、差表示	90

5.1.3 和、差信号真值估计	92
5.2 后处理滤波器设计	93
5.2.1 全彩图像的最大似然估计	93
5.2.2 滤波器产生及其特性分析	95
5.2.3 初始彩色图像迭代滤波	98
5.3 实验	98
5.4 小结	101
参考文献	101
第6章 贝尔图像无损编码器应用实例	103
6.1 摄像头设计原理	103
6.2 自动聚焦与自动光圈模块	105
6.2.1 聚焦评价函数算法及实现	105
6.2.2 聚焦方向搜索算法及实现	107
6.2.3 步进电动机驱动实现	108
6.2.4 自动光圈控制	108
6.3 无损编码器在 FPGA 中的实现	109
6.3.1 因果插值模块	109
6.3.2 模式选择模块	111
6.3.3 游长计数模块	112
6.3.4 游长编码模块	112
6.3.5 游长结束判断模块	113
6.3.6 中断采样编码模块	113
6.3.7 梯度预测模块	114
6.3.8 预测修正模块	114
6.3.9 残差编码模块	114
6.3.10 Golomb-Rice 编码器	115
6.4 存储模块	116
6.5 帧率提升	117
6.5.1 输入缓存模块	118
6.5.2 SDRAM 总线仲裁模块	120
6.5.3 主控制器模块	120
6.5.4 SDRAM 控制器模块	121
6.5.5 时序发生器模块	124
6.5.6 输出缓存模块	124
6.6 色空间转换模块	125

6.7 小结	126
参考文献	128
第7章 总结与展望	130
参考文献	132

第 1 章 绪 论

1.1 图像传感器基本知识

1.1.1 图像传感器工作原理

图像传感器分为两类：一类称为电荷耦合器件（Charged Coupled Device, CCD）图像传感器，另一类称为互补金属氧化物半导体（Complementary Metal Oxide Semiconductor, CMOS）图像传感器。

1970 年，美国贝尔（Bell）实验室取得了 CCD 的专利^[1]。CCD 的基本结构是由彼此非常靠近的一系列 MOS（Metal Oxide Semiconductor, 金属氧化物半导体）电容组成的，它的基本功能就是电荷的产生、存储和转移。如图 1-1 所示，在光的照射下，由于光电效应，电荷随着光的持续照射，电荷越积越多。每一个光传感器是一个光探测器，通过光电效应，它把撞击到表面上的光子转换为电荷，通过一个足够长的时间（这一时间必须短于存储装置的饱和时间），积累的电荷达到可探测的数量。一般情况下，光探测器比传统的胶片更敏感，曝光时间较短，范围在 $1/10000 \sim 1/50\text{s}$ 之间。

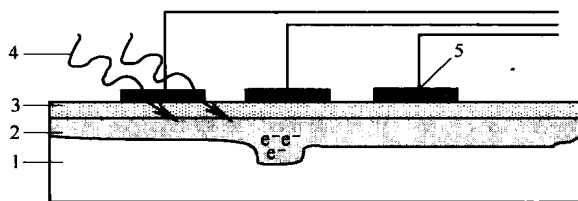


图 1-1 CCD 的光电效应

1—势阱 2—P 型硅 3— SiO_2 4—光辐射 5—电极

CCD 的每个感光单元相当于一个电容，产生的电荷就存储在 MOS 电容中。如图 1-2 所示，栅极可以看作电容的一极， SiO_2 为电容的介质，高掺杂的 P 型硅为电容的另一极。

如图 1-3 所示，有 A、B 和 C 3 个 MOS 电容，即 3 个栅极。在光辐射的作用下，中间的栅极 B 下积累了电荷。如果 3 个栅极的引线上同时施加有适当电压

和相位的方波信号, 就可以把栅极 B 下的电荷转移到其他栅极下, 从而实现电荷的转移。在方波信号的驱动下, 栅极 B 下的电荷转移到栅极 C 下, 然后转变为电压信号, 对信号进行条件放大以后, 模拟信号通过模/数 (A/D) 转换器转换为数字信号, 其大小正比于撞击在传感器上的光的强度。A/D 转换器通常有 8 位、10 位或 12 位, 可以覆盖整个信号的动态范围。模拟信号通过 A/D 转换器变为用 0 和 1

表示的数字信号, 送到信号处理电路处理, 后续的图像处理都是在数字化的基础上进行的。

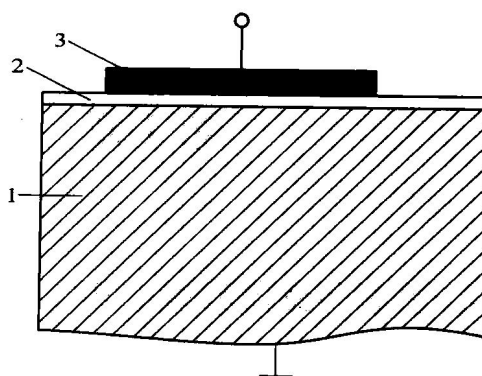


图 1-2 感光单元结构

1—P 型硅 2—SiO₂ 3—栅极

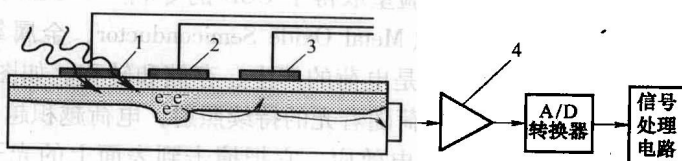


图 1-3 光电转换原理

1—栅极 A 2—栅极 B 3—栅极 C 4—电荷信号转化为电压信号

CMOS 图像传感器和 CCD 图像传感器的工作原理类似。CMOS 图像传感器并不像 CCD 图像传感器那样把光生电荷移至电荷电压变化器, 而是直接检测每个感光单元下的电荷。对 CMOS 图像传感器来说, 可以理解为将电荷电压转换电路集成到了每个 MOS 电容上。与 CMOS 图像传感器相比, CCD 图像传感器具有优良的动态范围、较小的背景噪声和较高的光灵敏度。不过, CMOS 图像传感器对功率的要求比 CCD 图像传感器要低很多, 而且 CMOS 图像传感器的成本比 CCD 图像传感器低。在一些不要求高分辨率和低背景噪声的场合, CMOS 图像传感器用得比较多, 像现在的中、低端手机的摄像头, 基本上采用的是 CMOS 图像传感器。分析仪器、天文观测仪器、高档数码相机一般都采用 CCD 图像传感器。随着 CMOS 工艺技术的不断改进和完善, CMOS 图像传感器在许多消费类高端数码相机中也得到了广泛应用。

1.1.2 彩色滤波阵列

图像传感器分为线型和面型两类。线型图像传感器主要用于扫描仪、分析仪

器等方面,面型(也称面阵)图像传感器主要用于数码相机、摄像机、检测设备等方面。面型图像传感器又可分为单色和彩色两种类型,目前基于彩色图像传感器的成像设备已得到了广泛应用。由于体积、功耗、成本、制造工艺等多方面因素的制约,绝大多数摄像设备采用单片图像传感器,如数码相机、视频摄像机、PDA(Personal Digital Assistant,个人数字助理)、移动电话、机器人、无线内窥镜等。因为图像传感器得到数字化影像是单色的,只有灰度变化,为了捕获彩色图像,采用聚酞亚胺掩膜技术在传感器的每个感光单元上覆盖一层微小光学滤镜,只允许某波段光线透过,使得该单元产生相应的电流来代表该波段表示颜色的色度和强度。如图1-4所示,透过R、G、B彩色滤镜的某种基色将在半导体彩色感光单元上产生相应强度的电流。

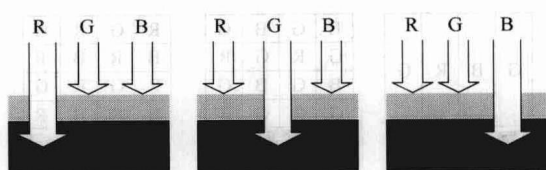


图1-4 半导体彩色感光单元

通常把彩色图像传感器表面覆盖的滤镜称为彩色滤波阵列(Color Filter Arrays, CFA)。最常用的滤镜阵列为棋盘格式,按照透过不同色光的排列方式,将棋盘格式滤镜阵列分成两类。绝大多数摄像产品采用原色贝尔模板彩色滤波阵列(Bayer Pattern CFA)和CMYG(青色、洋红色、黄色、绿色)补色阵列。如图1-5a所示,R、G、B分别表示透红色、透绿色和透蓝色的滤镜阵列单元,原色R、G、B贝尔模板的主要特征是以间隔的方式放置红色、绿色、蓝色的滤镜,而且绿色滤镜的数量为红色(或蓝色)滤镜的2倍。这是因为人眼对绿色光波比红、蓝两色光波要敏感得多,所以这样的数量分配就使得人眼所看见的图像亮度适宜,更接近真实色彩。图1-5b所示是CMYG补色模板,C、M、Y、G分别表示透青色、透洋红色、透黄色以及透绿色的滤镜阵列单元,它是由青色、洋红色、黄色和绿色的滤镜构成的,4种滤镜的数目是相等的。

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

a)

Cy	Ye	Cy	Ye
Mg	G	Mg	G
Cy	Ye	Cy	Ye
Mg	G	Mg	G

b)

图1-5 两种模板

a) 贝尔CFA模板 b) CMYG补色模板

原色 CCD 以三基色 (R、G、B) 为感光基础, 优点是色彩调和准确、还原度高、色彩鲜艳、后期数字影像处理调色容易, 缺点是色阶较窄、黑白两色容易形成杂点; 补色 CCD 的优点是色阶较宽、色彩混合变化细致, 缺点是色彩过于细致使影像表现较柔、不够鲜明、后期数字影像处理容易产生色散或偏色的问题。

还有许多种 CFA 模板, 如图 1-6 所示, 它们的滤镜排列方式和颜色成分所占的比例不同, 每种 CFA 模板下方是其相应的傅里叶谱。

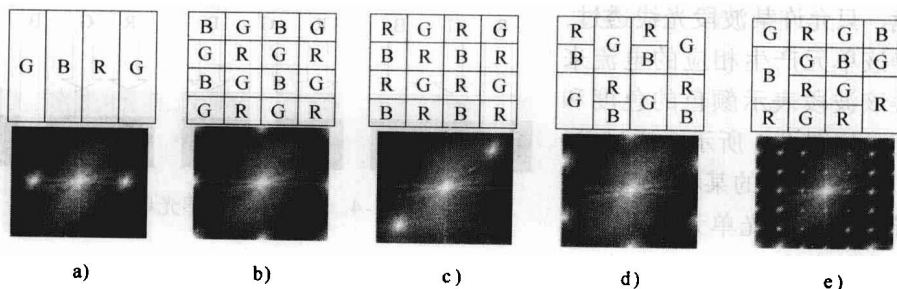


图 1-6 5 种 CFA 模板及其频谱

a) 条形模板 b) 贝尔模板 c) 红色对角模板 d) 绿条模板 e) 伪随机模板

理论研究表明, 贝尔模板图像传感器与人眼的视觉特性较为接近^[2]。如图 1-7 所示, 贝尔模板图像传感器模拟了人眼视觉成像的过程。

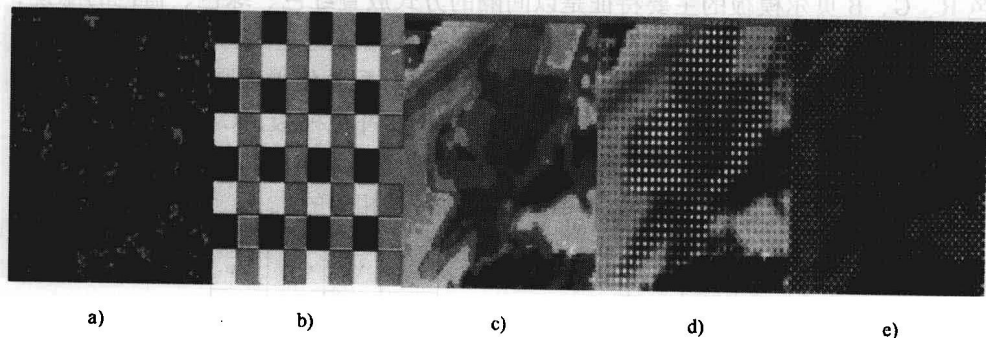


图 1-7 贝尔模板图像传感器模拟人眼视觉成像的过程

a) 人眼色细胞 b) 贝尔模板 c) 全彩图像 d) 贝尔灰度图像 e) 贝尔彩色图像

在贝尔模板阵列中, 绿色感光单元占总像素数的 $1/2$, 红、蓝感光单元各占 $1/4$, 这是由于绿色在图像总亮度中占有较大比重。如图 1-8 所示, 在贝尔模板图像传感器光谱灵敏度曲线^[3,4]中, 绿色的能量显然大于红色、蓝色的能量。注意, 曲线会因传感器前端的光学系统 (光学成像镜片和红外滤光片) 而有所变化。

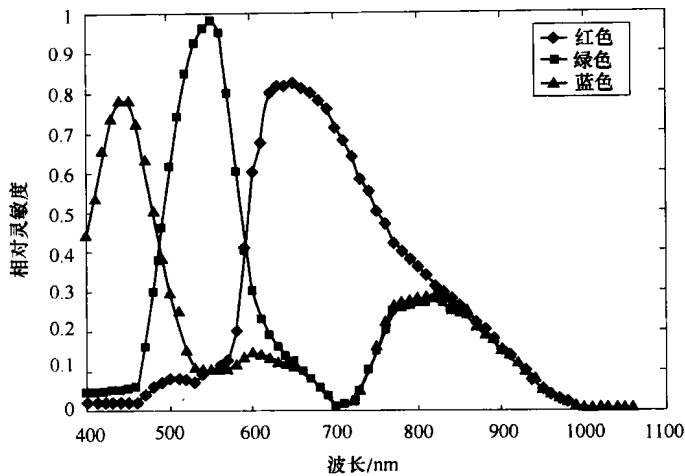


图 1-8 彩色图像传感器色谱灵敏度曲线

注：本图取自参考文献 [3]。

1.1.3 彩色图像成像处理流程

通常的数字摄像机成像流程如图 1-9 所示。首先进行曝光控制和聚焦位置确定，与之相关的控制参数由捕获的场景内容决定。值得提出的是，图像传感器的衬底和滤镜对近红外段的光谱很敏感，因而在传感器前要设置红外滤光片（又被称为热镜）以防止图像质量下降。曝光控制的目标是获得合适的光圈孔径、电子快门和增益。过度曝光或曝光不足均会导致彩色图像质量下降。自动聚焦控

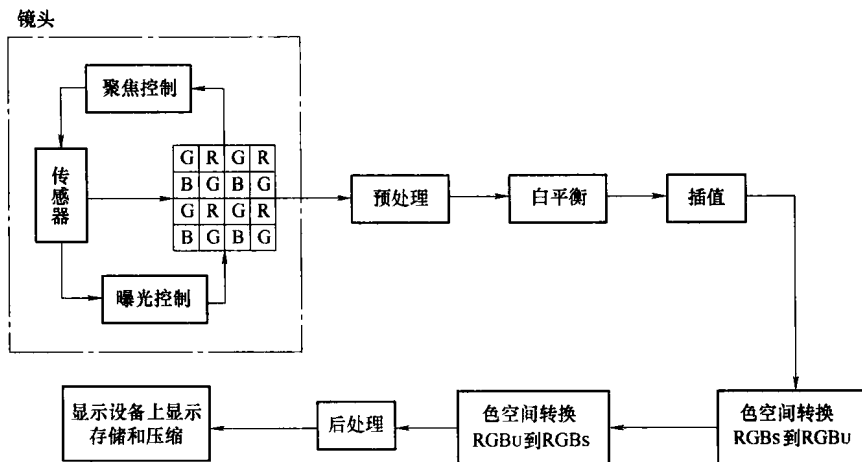


图 1-9 数字摄像机成像流程

制的方法有两种,即主动式和被动式。主动式聚焦原理是摄像机发出红外光束,通过计算被摄物体反射距离来确定镜头聚焦位置。被动式聚焦又可分为两种:一种是通过分析图像高频成分获得最佳聚焦位置^[5];另一种是相位检测法,根据镜片上下两部分光线透射到聚焦平面上是否相交来决定最佳聚焦位置^[6]。

预处理部分包括污点检测、噪声削减、线性化和暗电流补偿。污点噪声检测矫正通常由邻域插值法完成。ISO 14524 中给出了线性化的具体方法^[7]。暗电流是图像传感器由于热电子的存在而固有的,随着环境温度和曝光时间而变化,是图像的加性噪声,对低曝光图像质量的影响尤其突出,通常从正常曝光的图像中减去暗像素产生的电流值即可。

白平衡功能保证在任何色温下的白色物体在摄像机的彩色空间中也能被表示为白色。白平衡调节分为手动和自动两种方式:手动方式通过调整色差坐标系中收敛区域的形状来完成;自动白平衡调节方法复杂且往往不会取得更满意的效果,参考文献[8,9]中给出了典型的算法。

全彩图像重构(又称 CFA 插值或反马赛克)。由于受到物理结构的限制,CCD 彩色图像传感器在一个像素上只能采集 R、G、B 颜色的一个分量,并且是通过使用 CFA 来实现的。为了重构全彩图像,必须要估计出另外两种丢失的颜色分量值,这种方法通常称为彩色插值(Color Interpolation)方法或者彩色去马赛克(Color Demosaicing)处理。

从贝尔模板图像传感器获得的原始 CFA 图像中,在每个像素位置均丢失了另外两种基色,因此必须通过有效的算法来估计这些丢失的像素值才能恢复全彩图像。彩色插值原理如图 1-10 所示。

CFA 插值算法是成像过程中计算负荷最大的环节,同时也是数字成像设备的核心技术之一,往往被保密或受专利保护。参考文献[10-13]中给出了一些具有代表性的仿真研究算法。

对于场景彩色空间转换,基于图像传感器的摄像机物理彩色空间与人眼视觉特性的彩色空间(也称场景彩色空间)差异很大,不适合信号处理计算或存储,而最终输出的图像必须被转换到人眼视觉系统特性的彩色空间,才能便于计算或存储。常用的人眼视觉彩色空间有 CIEXYZ、ISO-RGB^[14]和 RIMM-RGB^[15]。Finlayson 和 Drew 提出了基于白点保护最小方均误差的色空间转换方法^[16]。

对于输出彩色空间转换,因为场景彩色空间不适合图像输出应用,一般场景彩色空间的数据精度是 10~16bit,而输出为 8bit,用 sRGB 表示输出彩色空间,显然该空间的色谱范围较窄,但多媒体应用中的数据属于这个空间。更详细的讨论见参考文献[17]。

对于终端显示的彩色空间转换,根据显示终端的不同,如 CRT(阴极射线管)显示、液晶显示、投影仪、打印机等,需要进一步进行伽玛校正、电平偏

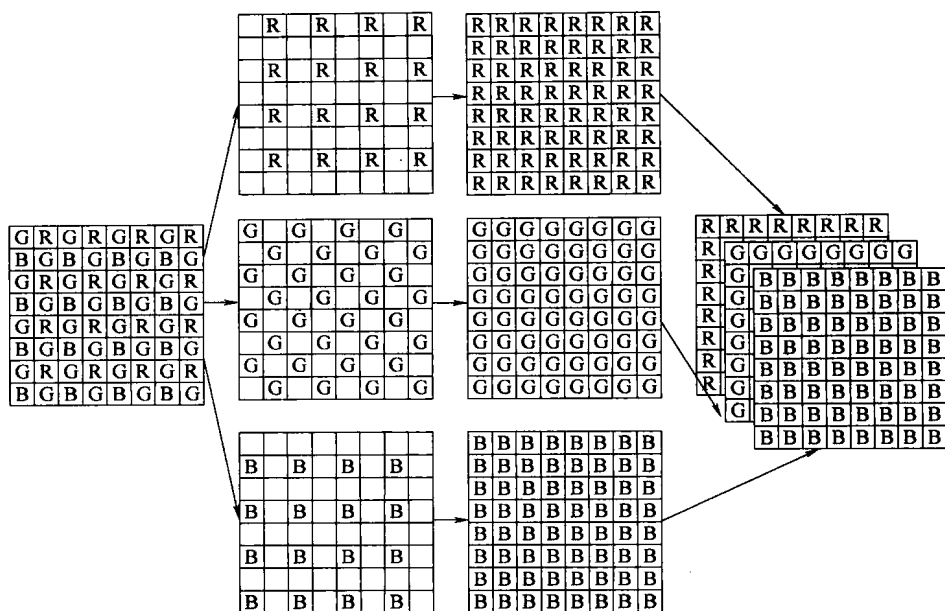


图 1-10 彩色插值原理

移、色温变换等处理，才能在终端上得到高质量的彩色图像。

后处理的作用主要是增强图像质量，消除伪彩色、拉链效应等，使得图像细节边缘更加清晰。同时在成像过程中获得一些不必要的高频细节，影响人的主观视觉，通过设置合理的门限系数来去除。

图像压缩存储分为两种方式：一种是在摄像机处理流程的最后环节采用 JPEG、JPEG2000 等技术对全彩图像压缩，通常称为插值后压缩；另一种为插值前压缩，即直接对预处理后的贝尔模板图像压缩。直接压缩贝尔模板图像的方法避免了处理器进行高负荷的 CFA 插值运算，简化处理流程，提高了信号处理效率，对于功耗要求苛刻的便携式摄像设备具有重要的应用意义，可以大大延长电池使用时间；另一方面，贝尔模板图像的数据量仅为全彩图像的 1/3，同时由于 CFA 插值并不增加信息熵，仅仅是引入了更多的信息冗余，因而直接压缩贝尔模板图像可以获得更好的压缩编码效果。

全彩图像重构和贝尔图像的直接压缩是摄像设备的两项关键技术，也是当前图像传感器成像研究领域的重要分支。

1.2 贝尔模板图像压缩的研究现状

1.2.1 常见的图像压缩方法

图像是人类最主要的信息源。在信息爆炸的时代，图像数据压缩技术是解决

海量图像数据的存储和传输的重要手段。因此寻求最佳的图像数据压缩技术也始终是信息技术领域中的一个研究热点。

图像数据之所以能被压缩,就是因为数据中存在着冗余。图像数据的冗余主要表现在4个方面:图像中相邻像素间的相关性引起的空间冗余;图像序列中不同帧之间存在相关性引起的时间冗余;不同彩色平面或频谱带的相关性引起的频谱冗余;人类视觉系统也造成了某种程度的心理视觉冗余。

图像压缩的实质就是去除图像冗余,将二维像素阵列变换为一个在统计上无关联的数据集合,以较少的比特数有损或无损地表示原来的像素矩阵,减少表示数字图像时需要的数据量。图像压缩也称图像编码。

常用的基本图像压缩方法包括以下4种:

1) 行程长度压缩(RLE),其原理是将一扫描行中颜色值相同的相邻像素用一个计数值和那些像素的颜色值来代替。例如,aaabcccccddeee可用3a1b6c2d3e来代替。对于拥有大面积、相同颜色区域的图像,用RLE方法非常有效。

2) 霍夫曼编码,其基本原理是频繁使用的数据用较短的代码代替,很少使用的数据用较长的代码代替,每个数据的代码各不相同。这些代码都是二进制码,且码的长度是可变的。例如,有一个原始数据序列ABACCDAA,编码为A(0),B(10),C(110),D(111),压缩后为010011011011100。产生霍夫曼编码需要对原始数据扫描两遍,第一遍扫描要精确地统计出原始数据中的每个值出现的频率,第二遍是建立霍夫曼树并进行编码,由于需要建立二叉树并遍历二叉树生成编码,因此数据压缩和还原速度都较慢,但简单有效,因而得到了广泛的应用。

3) LZW压缩,LZW压缩技术比其他大多数压缩技术都复杂,压缩效率也较高。其基本原理是把每一个第一次出现的字符串用一个数值来编码,在还原程序中再将这个数值还原成原来的字符串。如用数值0x100代替字符串“abccddeee”,这样每当出现该字符串时,都用0x100代替,起到了压缩的作用。0x100与字符串的对应关系则是在压缩过程中动态生成的,而且这种对应关系隐含在压缩数据中,随着解压缩的进行,这张编码表会从压缩数据中逐步得到恢复,后面的压缩数据再根据前面数据产生的对应关系产生更多的对应关系,直到压缩文件结束为止。LZW压缩是可逆的,所有信息全部保留。

4) 算术编码,其与霍夫曼编码压缩方法类似,只不过它比霍夫曼编码更加有效。算术压缩适合于由相同的重复序列组成的文件,算术压缩接近压缩的理论极限。这种方法是将不同的序列映像到0~1之间的区域内,该区域表示成可变精度(位数)的二进制小数,概率越小的数据要求的精度越高(更多的位数)。

为进一步提高压缩比,产生了许多种数字图像压缩技术,可以分为无损压缩