

## CFA 图像插值算法在 DSP 实时系统上的应用

孙海江<sup>1,2</sup>, 吴川<sup>1</sup>, 王延杰<sup>1</sup>

- (1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要:** 彩色滤波阵列(CFA)格式的图像需要进行图像插值,才能获得全彩色图像。但是,由于相机噪声的存在,不仅该点的彩色信息失真,同时还会影响邻近像素利用该点信息进行插值的图像颜色。为了得到高质量的全彩色图像,采用了一种基于梯度的滤噪插值算法,在保留了图像边缘和细节信息的同时,滤除了噪声,使图像的信噪比提高了近 1 倍;由于这种数字相机没有白平衡处理,使插值恢复的彩色图像颜色与实际景物相比存在较大差异,为了消除这种差异,实现了自适应白平衡校正方法,使图像方差提高了近 20%,与人眼观察到实际景物的颜色更接近;整个彩色编码算法应用了 DSP 的并行流水线技术,保证了其在 DSP 上运行的实时性,处理频率达到 25 Hz。

**关键词:** 彩色滤波矩阵; 插值算法; 自适应白平衡; DSP; 并行流水

**中图分类号:** TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2011)06-1187-06

## Application of CFA images interpolation algorithm in DSP real-time system

Sun Haijiang<sup>1,2</sup>, Wu Chuan<sup>1</sup>, Wang Yanjie<sup>1</sup>

- (1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The images of color filter array (CFA) form need an interpolation process commonly for producing the full-color images. The noise of imaging sensors not only corrupts the color filter array, but also influences the quality of images at the same time. In order to acquire high quality full-color images, a sort of viable and effective interpolation algorithm was adopted based on gradient, at the time of reserving image border and detail information clearly, the noise was removed and video SNR was nearly two times than before. Because of not having white balance in this digital camera, it has many difference from the color of images based on interpolation algorithm to real scene. In order to eliminate the difference, adaptive adjust for color balance was realized, image mean square was nearly increased by 20%, and it was more nearness for human eyes to look scenery. The color filter method for CFA images by parallel pipeline can solve the real-time problem on DSP and disposing frequency can reach 25 Hz.

**Key words:** color filter array; interpolation algorithm; adaptive color balance; DSP; parallel pipeline

收稿日期:2010-10-12; 修订日期:2010-11-30

基金项目:中国科学院创新项目(O60Y32T060)

作者简介:孙海江(1980-),男,助理研究员,博士生,主要从事数字图像处理的研究工作。Email:sunhaijiang@126.com

导师简介:王延杰(1963-),男,研究员,博士生导师,主要从事数字图像实时处理技术的研究工作。Email:wjciomp@gmail.com

## 0 引言

随着科技的发展,不论在军事领域还是民用领域,单 CCD 构成的彩色数字摄像机正广泛用于图像输入设备,其输出的彩色图像叫做彩色滤波阵列(CFA)格式图像。

近年来,基于 CFA 图像的彩色复原算法的研究越来越多,Hamilton 和 Adams<sup>[1]</sup>提出了自适应插值法<sup>[2]</sup>,以及加权系数法<sup>[3]</sup>、交互式插值法<sup>[4]</sup>和基于向量<sup>[5]</sup>等包含着大量的卷积、图像时域到频域的转变等复杂运算的方法。最近几年,针对向量的插值方法也很难满足工程中对实时性的要求。而便于硬件实现的常用方法有以下几种:

(1) 双线性插值法<sup>[6]</sup> 属于单通道独立插值法,求一点的未知彩色分量,主要是由该点相邻的同彩色分量的平均值获得。该方法运行速度较快,但忽略了细节信息和 3 个颜色通道之间的相关性,所以,双线性法往往不能得到满意的插值效果,而且没有考虑方向性,容易在图像边缘处产生锯齿形图案。

(2) 色比恒定法<sup>[7]</sup> 不同的颜色通道间具有很强的相关性,该方法考虑了这种相关性,重构图像的质量有了明显提高,但实质上还是属于双线性法的范畴。

(3) 基于梯度方法<sup>[8-9]</sup> 避免了彩色图像在边缘出现锯齿形图案。但是,并没有考虑噪声对图像的影响,使噪声及附近的彩色复原失真。

为了滤除噪声对图像彩色编码质量的影响,文中采用了梯度滤噪插值算法,在保留图像边缘和细节信息的同时,滤除了噪声,提高了图像的信噪比;由于单 CCD 数码相机采集的 CFA 格式的图像数据多数没有白平衡校正,使得恢复的 RGB 彩色图像与实际景物的彩色信息有差异,为了校正这种差异,对通过插值后获得的全彩色图像进行自适应白平衡校正处理,使恢复的图像色彩更逼真;在处理的实时性上,为了使文中的方法在 DSP 平台上高效的运行,采用了基于 DSPc6x 并行流水线技术,针对 1008(H)×1018(V)大小的图像数据,处理频率可以达到 25Hz 以上。

## 1 CFA 图像彩色复原方法

### 1.1 CFA 图像

CFA 图像上每个格点仅有一种颜色分量的灰度

值。由于人眼感光特性,目前使用最普遍的是 GRGB 色板,即 Bayer 彩色滤波阵列,如图 1 所示。

G <sub>11</sub>	R <sub>12</sub>	G <sub>13</sub>	R <sub>14</sub>	G <sub>15</sub>	R <sub>16</sub>
B <sub>21</sub>	G <sub>22</sub>	B <sub>23</sub>	G <sub>24</sub>	B <sub>25</sub>	G <sub>26</sub>
G <sub>31</sub>	R <sub>32</sub>	G <sub>33</sub>	R <sub>34</sub>	G <sub>35</sub>	R <sub>36</sub>
B <sub>41</sub>	G <sub>42</sub>	B <sub>43</sub>	G <sub>44</sub>	B <sub>45</sub>	G <sub>46</sub>
G <sub>51</sub>	R <sub>52</sub>	G <sub>53</sub>	R <sub>54</sub>	G <sub>55</sub>	R <sub>56</sub>
B <sub>61</sub>	G <sub>62</sub>	B <sub>63</sub>	G <sub>64</sub>	B <sub>65</sub>	G <sub>66</sub>

图 1 标注了坐标位置的 Bayer 型 CFA 图像阵列

Fig.1 Bayer CFA pattern with the coordinate image array

它是交替使用一组红色和绿色滤镜以及一组绿色和蓝色滤镜获得的图像,其中绿色像素个数占总像素的 1/2,红色和蓝色则各占 1/4。由于绿色分量占了一半的比例,具有更多的图像细节信息,因此,插值算法多是先从恢复 G 分量开始。

### 1.2 基于梯度的滤噪方法

基于梯度方法,没有考虑到噪声点对算法的影响,当图像存在噪声时,如果把噪声当成颜色信息参与计算复原后的图像,不仅该点的颜色失真,利用该点数据的临近四点恢复的彩色分量也会出现失真。假设  $G_{i,j}$  是一个高频噪声点,则  $G_{i-1,j}$ 、 $G_{i+1,j}$ 、 $G_{i,j-1}$ 、 $G_{i,j+1}$  和  $G_{i,j}$  5 点的 G 分量都会失真。因此对噪声的处理在彩色图像的复原中十分重要,而通常的中值和均值滤波都是针对灰度图像的方法,不适用于 CFA 格式的图像。文中融合了 Hibbard<sup>[8]</sup> 和 Laroche<sup>[9]</sup> 计算梯度的方法,通过将两者的梯度计算结果联系起来,经过判断,剔除了噪声点的影响,找到真正的图像边缘。

如图 1 所示,设  $B_{i,j}$  为图像中 B 分量的一点,为了恢复该点的 G 分量  $G_{i,j}$ ,设  $A_1$  为该点水平方向的内层梯度, $B_1$  为竖直方向的内层梯度,通过计算一阶微分得:

$$\begin{cases} A_1 = |G_{i,j-1} - G_{i,j+1}| \\ B_1 = |G_{i-1,j} - G_{i+1,j}| \end{cases} \quad (1)$$

设  $A_2$  为该点水平方向的外层梯度, $B_2$  为竖直方向的外层梯度,通过计算二阶微分得:

$$\begin{cases} A_2 = |2 \times B_{i,j} - B_{i,j-2} - B_{i,j+2}| \\ B_2 = |2 \times B_{i,j} - B_{i-2,j} - B_{i+2,j}| \end{cases} \quad (2)$$

根据内外两层的梯度结果, 具体判断图像是否真正存在边缘信息, 还是有噪声点的影响。设枚举变量  $TH$  表示点  $G_{ij}$  上下左右的临近像素是否存在噪声, 是否在该点处存在水平或垂直的边缘信息。 $TH$  的计算公式如公式(3)所示。

$$TH = \begin{cases} \text{up} & (A_1 < B_1) \& (A_2 = B_2) \& (|2G_{i,j-1} - G_{i-1,j} - G_{i+1,j}| > |2G_{i,j+1} - G_{i-1,j} - G_{i+1,j}|) \\ \text{down} & (A_1 < B_1) \& (A_2 = B_2) \& (|2G_{i,j-1} - G_{i-1,j} - G_{i+1,j}| < |2G_{i,j+1} - G_{i-1,j} - G_{i+1,j}|) \\ \text{left} & (A_1 > B_1) \& (A_2 = B_2) \& (|2G_{i-1,j} - G_{i,j-1} - G_{i,j+1}| > |2G_{i+1,j} - G_{i,j-1} - G_{i,j+1}|) \\ \text{right} & (A_1 > B_1) \& (A_2 = B_2) \& (|2G_{i-1,j} - G_{i,j-1} - G_{i,j+1}| < |2G_{i+1,j} - G_{i,j-1} - G_{i,j+1}|) \\ \text{no} & (A_1 = B_1) \& (A_2 = B_2) \\ \text{level} & (A_1 > B_1) \& (A_2 > B_2) \\ \text{erect} & (A_1 < B_1) \& (A_2 < B_2) \end{cases}$$

$$(i=2,4,\dots; j=1,3,\dots; x=i-1,i+1; y=j-1,j+1) \quad (3)$$

式中: up 表示  $G_{i,j-1}$  为噪声; down 表示  $G_{i,j+1}$  为噪声; left 表示  $G_{i-1,j}$  为噪声; right 表示  $G_{i+1,j}$  为噪声; no 表示没有噪声同时也没有边缘; level 表示水平方向存在边缘; erect 表示垂直方向存在边缘; 因此,  $G_{ij}$  最后的恢复公式为:

$$G_{ij} = \begin{cases} (G_{i-1,j} + G_{i+1,j} + G_{i,j+1})/3 & TH = \text{up} \\ (G_{i-1,j} + G_{i+1,j} + G_{i,j-1})/3 & TH = \text{down} \\ (G_{i+1,j} + G_{i,j-1} + G_{i,j+1})/3 & TH = \text{left} \\ (G_{i-1,j} + G_{i,j-1} + G_{i,j+1})/3 & TH = \text{right} \\ (G_{i-1,j} + G_{i+1,j} + G_{i,j-1} + G_{i,j+1})/4 & TH = \text{no} \\ (G_{i-1,j} + G_{i+1,j})/2 & TH = \text{level} \\ (G_{i,j-1} + G_{i,j+1})/2 & TH = \text{erect} \end{cases} \quad (4)$$

恢复  $G_{ij}$  的同时对噪声进行处理, 噪声的替代方法为:

$$\begin{cases} G_{i,j-1} = G_{ij} & TH = \text{up} \\ G_{i,j+1} = G_{ij} & TH = \text{down} \\ G_{i-1,j} = G_{ij} & TH = \text{left} \\ G_{i+1,j} = G_{ij} & TH = \text{right} \end{cases} \quad (5)$$

同理, 该点的红色分量  $R_{ij}$  由公式(1)中给出的方法判断出该点处在平滑区域还是水平或垂直梯度区域上, 从而选取  $R_{i-1,j}$ 、 $R_{i+1,j}$ 、 $R_{i,j-1}$  和  $R_{i,j+1}$  4 点中的两点或 4 点计算获得。而这 4 点则由原始数据  $R_{i-1,j-1}$ 、 $R_{i-1,j+1}$ 、

$R_{i+1,j-1}$  和  $R_{i+1,j+1}$  通过双线性法获得。

噪声滤除前后的对比效果如图 2~图 4 所示, 图 2 为原始图像, 在均匀的背景中存在明显的噪声, 即黑框内所示的白色亮点。图 3 为通常的插值算法不能滤除的噪声点, 使噪声参与了彩色复原的运算, 不仅本身的彩色信息出错, 还使周围像素的彩色分量出现失真。图 4 为上面所述的方法, 有效滤除了噪声, 使画面更纯净。

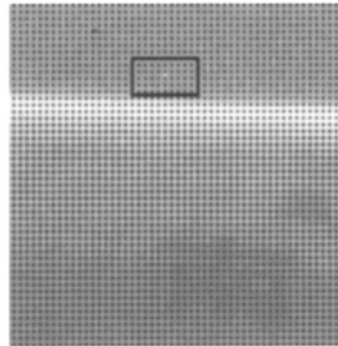


图 2 原始 CFA 图像

Fig.2 Original CFA image

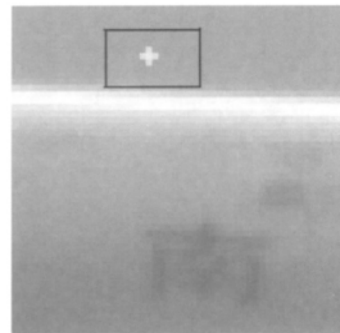


图 3 没有滤噪功能的插值算法

Fig.3 Interpolation algorithm without removing the noise

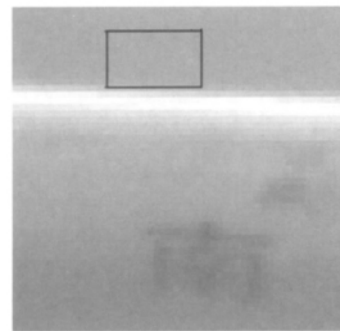


图 4 文中方法

Fig.4 Proposed algorithm

上面的方法虽然考虑了噪声的滤除, 但是没有考虑到色彩的逼真度, 使恢复的图像颜色与实际颜

色存在较大差异。为了消除这种差异,必须对其进行白平衡校正。

### 1.3 自动白平衡<sup>[10]</sup>

由于单 CCD 数字相机采集的 CFA 格式的图像数据多数没有白平衡校正,使得恢复的 RGB 彩色图像与实际景物的彩色信息有差异,为了校正这种差异,要对 R,G,B 3 个分量分别乘以一个校正系数,即进行白平衡校正。一般的方法是采用手动调节或让相机对着均匀的白背景,经过计算得到校正系数,但是此方法得到的校正系数相对固定,容易随着时间和色温的变化而失效,给实际应用带来不便。为了提高参数的有效性及鲁棒性,采用自适应参数校正法,可以随时间色温的变化而得到实时变化的校正系数。主要是根据实时计算整幅图像 R、G、B 分量的均值来实现的。设 3 个彩色分量的均值为  $R\_Mean$ 、 $G\_Mean$  和  $B\_Mean$ ; 3 个校正系数分别为  $R\_IER$ 、 $G\_IER$  和  $B\_IER$ ; 最大的彩色分量的均值为  $Max\_Mean$ ; 图像大小为  $1008(H) \times 1018(V)$ , 设  $(i,j)$  为插值恢复的彩色图像中一点, 该点的 3 个彩色分量分别为  $f_r(i,j)$ 、 $f_g(i,j)$  和  $f_b(i,j)$ 。方法如下:

$$\begin{cases} R\_Mean = \sum_{i=0}^{1008} \sum_{j=0}^{1018} f_r(i,j) / (1008 \times 1018) \\ G\_Mean = \sum_{i=0}^{1008} \sum_{j=0}^{1018} f_g(i,j) / (1008 \times 1018) \\ B\_Mean = \sum_{i=0}^{1008} \sum_{j=0}^{1018} f_b(i,j) / (1008 \times 1018) \end{cases} \quad (6)$$

$$Max\_Mean = \max(R\_Mean, G\_Mean, B\_Mean) \quad (7)$$

$$\begin{cases} R\_IER = Max\_Mean / R\_Mean \\ G\_IER = Max\_Mean / G\_Mean \\ B\_IER = Max\_Mean / B\_Mean \end{cases} \quad (8)$$

点  $(i,j)$  的 RGB 3 个分量校正公式如下:

$$\begin{cases} f_r(i,j) = f_r(i,j) \times R\_IER \\ f_g(i,j) = f_g(i,j) \times G\_IER \\ f_b(i,j) = f_b(i,j) \times B\_IER \end{cases} \quad (9)$$

白平衡试验,场景分为室外和室内,可以考察自适应白平衡校正对不同环境色温的适应能力,验证其鲁棒性。图 5(a)为室外原始 CFA 图像,图 5(b)为自适应白平衡校正前的全彩色图像,图 5(c)为自适应校正后的彩色图像,色彩更逼真,更贴近现实。

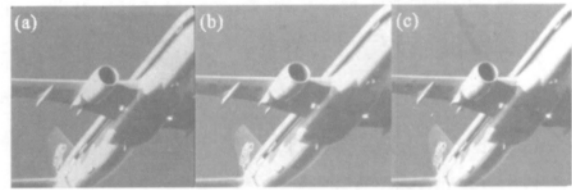


图 5 室外原始 CFA 图像,白平衡校正前和自适应白平衡校正后的图像

Fig.5 Original CFA image outside, and images before and after adaptive color balance

室内夜晚日光灯照明下的试验图片如图 6 所示,说明此彩色复原算法在不同光照、环境色温下有很好的适应性。图 6(a)为室内原始 CFA 图像,图 6(b)为自适应白平衡校正前的全彩色图像,图 6(c)为自适应校正后的彩色图像,可以看出白色比较纯正。



图 6 室内原始 CFA 图像,白平衡校正前和自适应白平衡校正后的图像

Fig.6 Original CFA image indoor, and images before and adaptive color balance

### 1.4 基于 DSP 的硬件平台和软件优化<sup>[11-13]</sup>

文中的 CFA 图像彩色复原算法,结合了梯度滤波插值法和自适应白平衡校正处理,虽然得到了颜色纯净色彩逼真的图像,却因为算法的复杂度影响了实时性。

由于算法多为乘加运算,符合 DSP 的运算特点,为了提高算法的实时性,实现设备的小型化,采用 Ti 公司高性能的 DSP(TMS320C6416)为核心处理器的图像处理平台。该平台主频达到 1 GHz,运算速度可达 8 000 MIPS,可以编排并行流水指令,每周期最多可并行执行 8 条 32 bit 指令。FPGA 作为协处理器,主要完成图像实时采集、实时输出、存储器管理等。配有 128 M 的 SDRAM 作为外部存储器,可以连续循环处理 30 幅以上的图像数据,方便彩色编码算法的实施。硬件平台的原理框图如图 7 所示。

不仅采用了高速的硬件平台,还进行了高效的软件优化,采用了基于 DSPC6x 的并行流水线技术,



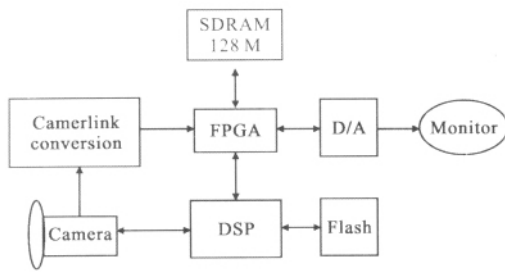


图 7 硬件原理框图

Fig.7 Diagram for hardware

大大提高了算法的实时性。采用代码执行效率最高的并行流水线技术(并行流水汇编),对文中的插值算法和白平衡校正算法进行并行汇编的编写,充分发挥了 DSP 并行处理能力,并且利用流水线技术可以使插值算法和白平衡校正算法并行在一起编程。

并行流水主要有 3 部分组成:循环填充、循环核心和循环排空。循环填充为程序进入循环核心做准备,循环核心是流水的核心,它并行的指令越多,CPU 利用的效率越高,循环排空是负责完成循环核心未完成的工作。如表 1 所示,“5~n”这一行为循环核心,并行了 5 条指令(最多可以并行 8 条指令),阴影之前为循环填充,之后为循环排空。针对一帧的图像数据,执行效率对比如表 2 所示。

表 1 并行流水线技术循环示意图

Tab.1 Cycle illustration of parallel pipeline

Execution cycle	Situation					Loop stage
1	A1					Pipelined-loop prolog
2	B1	A2				
3	C1	B2	A3			
4	D1	C2	B3	A4		
5~n	E1	D2	C3	B4	A5	Kernel
n+1		E <sub>n+1</sub>	D <sub>n+1</sub>	C <sub>n+1</sub>	B <sub>n+1</sub>	Pipelined-loop epilog
n+2			E <sub>n+1</sub>	D <sub>n+2</sub>	C <sub>n+2</sub>	
n+3				E <sub>n+3</sub>	D <sub>n+3</sub>	
n+4					E <sub>n+4</sub>	

表 2 3 种编程语言执行时间对比(单位:ms)

Tab.2 Time for three programs(ms)

	C language	Linear assembly	Parallel pipeline
Interpolation	112.39	84.89	24.34
Color balance	56.98	24.33	5.78
Interpolation and color balance	169.37	109.22	24.34

从数据可以看出,并行流水汇编不仅使每个模块的执行效率大大提高,而且将白平衡校正算法通

过并行流水技术,可以在插值算法执行的同时实现其并行操作,大大提高了代码的执行效率。

## 2 试验结果

上文获得的试验图像,使用的数字摄像机是 BASLER 公司的 A201 bc 数字摄像机,帧频为 30 Hz,靶面大小 1 008(H)×1 018(V)。不仅使每副图像的彩色复原在 30 ms 内完成,而且保证了彩色复原的图像质量。经典的图像质量客观评价方法主要有信噪比、方差和信息熵等。这里用信噪比衡量图 3 和图 4 有无滤波方法的两幅图像的质量,用方差来衡量有无白平衡对彩色图像复原的质量影响。

笔者近似地用图像均值与局域方差极大值相比,得到较好的近似计算效果:

$$SNR = \mu / \sqrt{LSD_{max}}$$

式中:μ 为图像的灰度均值;LSD<sub>max</sub> 为局域方差极大值。对图 3 和图 4 方框内的图像数据求 SNR 如表 3 所示。

表 3 SNR 值对比表

Tab.3 Contrast of SNR

	R	G	B
SNR of Fig.3	14.64	22.10	14.54
SNR of Fig.4	32.03	64.03	28.83

方差是反映图像整体灰度分布的统计量。方差越大,对比度越大;反之,若方差越小,则对比度也越小。方差的基本表达式为:

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{(M-1)(N-1)} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (f(i,j) - \hat{\mu})^2$$

式中:M 和 N 是图像的行、列数;f(i,j) 是像点(i,j)的灰度值;μ̂ 为整幅图像的灰度均值。

图 5(b)和图 5(c)比较,图 6(b)和图 6(c)比较,3 个彩色分量的方差数据如表 4 所示。

表 4 方差值对比表

Tab.4 Contrast table of variance

	Fig.5(b)	Fig.5(c)	Fig.6(b)	Fig.6(c)
Variance of R	1 562.96	1 562.96	5 566.79	5 566.79
Variance of G	1 467.08	1 289.01	5 981.40	6 308.75
Variance of B	412.45	1 428.29	4 202.23	5 866.81

### 3 结 论

文中介绍的 CFA 图像彩色编码算法不仅采用梯度滤波插值法降低了噪声对彩色复原的影响,使图像信噪比提高了近一倍,而且配合自适应白平衡校正算法,得到了色彩逼真的全彩色图像,整幅图像方差(对比度)提高了近 20%。在软件实现上,充分发挥了 DSP 内部的硬件结构,利用高效的并行流水线技术,满足了高帧频大面阵数字相机的 CFA 图像彩色复原的实时性,工作频率大于 25 Hz。

#### 参考文献:

- [1] Hamilton J, Adams J. Adaptive color plane interpolation in single sensor color electronic camera: USA, 5629734[P]. 1997.
- [2] Aelterman J, Goossens B. Locally adaptive complex wavelet-based demosaicing for color filter array images [C]//SPIE, 2009, 7248: 72480j1-72480j12.
- [3] Adams J E. Design of practical color filter array interpolation algorithms for digital cameras[C]//IEEE, 1998: 488-492.
- [4] Gunturk B K, Altunbasak Y, Mersereau R M. Color plane interpolation using alternating projections [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2002, 11(9): 997-1013.
- [5] Gunturk B K, Clotzbach J. Demosaicking: color filter array interpolation [J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2005, 22(1): 44-54.
- [6] Keys R G. Cubic Convolution interpolation for digital image processing [J]. *IEEE Transactions on Acoustic, Speech and Signal Processing*, 1981, 29: 1153-1160.
- [7] Soo-Chang Pei. Effective color interpolation in CCD color filter arrays using signal correlation [J]. *IEEE Transactions on Circuits and System for Video Technology*, 2003, 13(6): 503-513.
- [8] Hibbard R H. Apparatus and method for adaptively interpolating a full color image utilizing luminance gradients: USA, 5382976[P]. 1995.
- [9] Laroche C A, Prescott M A. Apparatus and method for adaptively interpolating a full color image utilizing chrominance gradients: USA, 5373322[P]. 1994.
- [10] Ming-Jung Seow, Vijayan K. On using an associative memory for improving digital color image: color characterization, enhancement, and color balancing [C]//IEEE Proceedings of International Joint Conference on Neural Networks, 2005: 1830-1835.
- [11] Zhu M, Lu J F, Zhao J, et al. Design of real time digital image processing system based TMS320c6202 DSP [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2003, 11(5): 497-501. (in Chinese)  
朱明, 鲁剑峰, 赵健, 等. 基于 TMS320C6202DSP 的实时数字图像处理系统的设计[J]. *光学精密工程*, 2003, 11(5): 497-501.
- [12] Dai Shaosheng, Yuan Xianghui. Improvement of DSP image Processing real-timeness [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2003, 11(6): 617-501. (in Chinese)  
代少升, 袁祥辉. 提高 DSP 图像处理系统实时性的一种有效方法[J]. *光学精密工程*, 2003, 11(6): 617-620.
- [13] Pan Xiaodong, Chen Zexiang, Gao Shengjiu, et al. Collection and display of infrared image data based on FPGA+DSP[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(6): 968-971. (in Chinese)  
潘小冬, 陈泽祥, 高升久, 等. FPGA+DSP 的红外图像数据采集与显示[J]. *红外与激光工程*, 2007, 36(6): 968-971.