

# 基于小波变换的多光谱光电耦合器件图像仿真

## Composing Multi - Spectral Time Delay Integral Charge Coupled Device Image Technology Based on Wavelet Transform

王文杰<sup>1,2</sup> 胡君<sup>1</sup> 王栋<sup>1</sup> 吴伟平<sup>1</sup>

(1. 中科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:** 为了仿时间延迟积分光电耦合器件(TDI CCD)输出信号,选取一幅真彩色 BMP 图像作为源图,通过小波变换将图像放大,放大图灰度化,再将源图分解为红、绿、蓝三色图像,将四幅图进行量化级调整得到有红、绿、蓝、全色四部分组成的仿 TDI - CCD 图像,较接近 TDI - CCD 光电转换产生的图像格式。利用仿 TDI - CCD 图像产生 TDI - CCD 信号,辅助相机设计和研制,替代 CCD 在研制阶段进行调试,在 CCD 到货前就可以进行相机设计,另外还避免了直接用 CCD 调试遇到的风险。

**关键字:** 多光谱 光电耦合器件 分色 小波变换 放大 灰度化

### 1 引言

应用于航空摄像领域的时间延迟积分光电耦合器件(以下简称 CCD),其制作工艺复杂,目前国内技术不够成熟,无法独立制造,只能从国外引进,而这种宇航级产品价格昂贵,供货周期长,实验中误操作或相机控制电路设计不当都有可能损坏 CCD,而且多次实验会影响 CCD 的性能,缩短其寿命。因此很有必要研制 CCD 的替代品辅助航天相机的设计。CCD 信号仿真及检测系统对 CCD 进行功能仿真,是相机设计和试验时较理想的 CCD 替代品。CCD 一方面接收相机驱动信号(CCD 输入信号),另一方面输出图像视频信号(CCD 输出信号),因此 CCD 信号仿真及检测系统必须具备 CCD 输入信号检测功能和图像视频输出功能,多光谱 CCD 视频图像输出仿真技术研究是 CCD 信号仿真及检测系统研制工作的重要组成部分。应用于航天领域的 CCD 结构特异,输出的图像结构也很特殊,为了仿 CCD 的图像输出功能,首先必须得到一幅利于仿输出的图,即 CCD 图像预制。这类图像,没有现成的,必须预置。现有数字图像按色彩分类可分为黑白图像与彩色图像,黑白图像只反映物体反射光的亮度信息,不包含反射光的光谱分布信息。多光谱 CCD 图像包含红绿蓝亮度信息,因此不能用黑白图作为源图像。现成的彩色图像按格式分类有 BMP、TIFF、TGA、EXIF、FPX、

JPEG、JIF 等,其中 BMP 较常见,且其结构清晰,色彩较易分离,CCD 图像与 BMP 图像相互转换都很方便<sup>[1]</sup>。拟选择彩色 BMP 文件转换为 CCD 图像。

### 2 TDI - CCD 图像结构及预置过程

用于航天可见光相机的 TDI - CCD 一般包含红色、绿色、蓝色三个感光区,三区宽度为  $w$ ,红绿蓝三感光区有效光敏元阵列行数相等,每行所含的光敏元数目均为  $m$ ,光敏元的直径均为  $d$ ,感光波段分别为 630 - 690 nm、520 - 600 nm、450 - 520 nm 三个区分别输出红、绿、蓝图像。为了获得更高质量的遥感图像,新型 CCD 增加了全色感光区,全色区与彩色区等宽为  $w$ ,光敏元一般较红绿蓝彩色区光敏元小,为  $\frac{d}{m}$ ,所以每行所含光敏元数量较彩色区多,为彩色区的  $m$  倍,感光波段为 450 - 690nm,输出灰度图,全色图宽、高为彩色图的  $m$  倍。

新型多光谱 TDI - CCD 感光产生的图像分为红、绿、蓝、全色四部分,以  $R(w, h)$ 、 $G(w, h)$ 、 $B(w, h)$ 、 $P(mw, mh)$  表示,其中  $w$ 、 $h$  为红、绿、蓝三色图像各自的宽、高(单位为像素),存储物体反射光的红色光谱、绿色光谱、蓝色光谱光强度,为全色图像与彩色图像的宽度比,全色存储的是物体反射光可见光段的光强度。

为了得到更真实、效果更好的仿真图像,选取一幅真彩色 BMP 图像  $C(w, h)$  作为源图像,转化过程如下图所示:

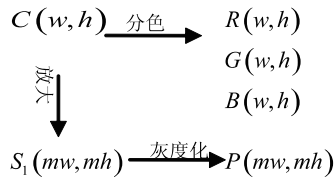


图 1 图像预置过程

### 3 图像分色

BMP 图像文件<sup>[2]</sup>由 4 个部分组成:位图文件头、位图信息头、彩色表和定义位图的字节阵列,位图文件头存储 BMP 文件的类型、文件大小和位图起始位置等信息。位图信息头用于说明位图的尺寸等信息。颜色表用于说明位图中的颜色,它有若干个表项,每个存储一组红、绿、蓝分量,定义一种颜色。真彩色 BMP 图像没有颜色表。位图数据记录了位图的每一个像素值,记录顺序是在扫描行内是从左到右,扫描行之间是从下到上。真彩色位图的一个像素占 3 字节,分别存储蓝、绿、红分量。

$$b(i, j) = s + 3iv + 3j$$

$$g(i, j) = s + 3iw + 3j + 1 \quad (1)$$

$$r(i, j) = s + 3iw + 3j + 2$$

$b(i, j)$ 、 $g(i, j)$ 、 $r(i, j)$  分别为蓝、绿、红图像第  $i+1$  行  $j+1$  列处的亮度。 $s$  为位图数据的起始地址。

### 4 基于小波变换的图像放大

本文提出一种新的图像放大算法,该算法以小波变换为基础,首先对原图像进行二进小波变换,得到四个子带图像,然后以分解后的高频系数为依据,采用分段样条插值法进行高频系数放大,将图像本身作为放大图像的低频成份,为了防止放大后的图像变得模糊,对变换系数进行非线性增强,最后通过小波逆变换得到放大的图像。放大的倍数取决于小波逆变换的次数

对一幅图像  $A_{2^i}^d f(L)$  进行二维小波分解,可以得到四幅子图像  $A_{2^i}^d f(LL_1)$ 、 $D_{2^i}^1(HL_1)$ 、 $D_{2^i}^2(LH_1)$  和  $D_{2^i}^3(HH_1)$ 。他们分别表示在尺度  $2^i$  上的水平低

通一垂直低通子图像,水平带通一垂直低通子图像,水平低通一垂直带通子图像,水平带通一垂直带通子图像。图像经过小波变换后,能够获得良好的空间一频率多分辨率表示,不仅保持了原图像的空间特性,而且很好地提取了图像的高频信息。在低频处有很好的频率特性,在高频处有很好的空间选择性。相反,如果能够通过一定的方法构造出四幅子图像,则由小波逆变换可完全重构出新的图像来。这就是基于小波变换的图像放大的基本思想。放大流程如下所示。

- ① 对原始图像进行一级小波分解。
- ② 采用分段样条插值法对三个高频子带进行放大。
- ③ 对放大后的高频系数进行自适应阈值处理。
- ④ 将原始图像作为低频部分,将放大的高频系数作为高频部分,进行非线性增强。
- ⑤ 进行小波逆变换,得到放大图像。

#### 4.1 小波变换

设信号  $\{C_{j+1, m, n}; m, n \in Z\}$  是二维图像  $f(x, y)$  在分辨率  $j+1$  上的近似表示,则二维信号  $\{C_{j+1, m, n}; m, n \in Z\}$  的有限正交小波分解公式为:

$$s(x) I_i = I_0 * \left(\frac{I}{I_0}\right)^{255} \quad (2)$$

设  $H_r$ 、 $G_r$  和  $G_c$  分别为算子  $H$ 、 $G$  对矩阵行和列的操作,定义如下:

$$H_r = (H_{k_1, m_1}) \quad G_r = (G_{k_1, m_1})$$

$$H_c = (H_{k_2, m_2}) \quad G_c = (G_{k_1, m_1})$$

$$H_{k, m} = h_{k-2m} \quad G_{k, m} = g_{k-2m}$$

则式(1)可表示为:

$$C_j = H_r H_c C_{j+1}$$

$$D_j^1 = H_r G_c C_{j+1}$$

$$D_j^2 = G_r H_c C_{j+1}$$

$$D_j^3 = G_r G_c C_{j+1} \quad (3)$$

重构算法可表示为:

$$C_{j+1} = H_r * H_c * C_j + H_r * G_c * D_j^1 + G_r * H_c * D_j^2 + G_r * G_c * D_j^3$$

$$(j = -J, -J+1, \dots, -1) \quad (4)$$

## 4.2 分段样条插值构造放大高频系数

对于高频系数的构造采用两点插值,即在相邻元素之间进行三次样条插值。设在区间 $[u_i, u_{i+1}]$ 内,插值函数为:

$$s(x) = c_0 + c_1x + c_2x^2 + c_3x^3 \quad (5)$$

因为和是型值点,且插值函数在和点具有最大值,所以:

$$s(u_i) = f(u_i) \quad s(u_{i+1}) = f(u_{i+1})$$

$$f(u_i) s'(u_i) = 0 \quad s'(u_{i+1}) = 0 \quad (6)$$

其三次多项式为:

$$s(u) = f(u_i) + s'(u_i)(u-u_i) + \frac{s''(u_i)}{2!}(u-u_i)^2 + \frac{s'''(u_i)}{3!}(u-u_i)^3 \quad (7)$$

由式(6)可得:

$$s(u) = f(u_i) + 3 \frac{f(u_{i+1}) - f(u_i)}{(u_{i+1} - u_i)^2} (u - u_i)^2 + 12 \frac{f(u_{i+1}) - f(u_i)}{(u_{i+1} - u_i)^2} (u - u_i)^3 \quad (8)$$

## 4.3 高频系数的自适应阈值处理

为了去除噪音,更好地保证放大图像的边界特征,需要对小波变换后的高频系数进行阈值处理。采用自适应阈值法进行阈值处理,该方法能够解决全局阈值法对图像的要求限制,解决局部阈值法的低效问题。在处理低质量图像时也有较好的效果,并且能在处理过程中很好地保留原图像的特征信息。自适应阈值处理的核心过程如下:对于小波变换域内的每个点首先判断其是否是局部极大值点,如果该点不是局部极大值点,则用整体阈值对该点进行阈值处理;若该点是局部极大值点,则根据其局部特性来获取它的局部阈值。

## 4.4 多尺度非线性增强

图像经过小波分解后,小波变换系数对应于不同尺度上的细节分量,通过非线性函数可以有效地改变各尺度上细节分量之间的对比程度。非线性函数表示为:

$$\hat{H}_{ij}(n_1, n_2) = p(H_{ij}(n_1, n_2)) = L^i M_{ij} g(H_{ij}(n_1, n_2)) / M_{ij}$$

其中

$$g(x) = \frac{[\text{sig}(c_2(x-b_2)) - \text{sig}(-c_2(x+b_2))]}{[\text{sig}(c_2(1-b_2)) - \text{sig}(-c_2(1+b_2))]} \quad (9)$$

$M_{ij}$  尺度  $i$  和方向  $j$  上的尺度系数中的模极大值。

$$\text{sig}(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}$$

$$b_2 = \frac{1}{(N^i)^2} \sum_{n_1=1}^{N_i} \sum_{n_2=1}^{N_i} |H_{ij}(n_1, n_2)| \quad (10)$$

$b_2$  用来控制临界点的参数,这样能够保证  $H_{ij}$  中大部分系数间的对比度得到增强。

$$c_2 = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{(N^i)^2} \sum_{n_1=1}^{N_i} \sum_{n_2=1}^{N_i} (y_j^i(n_1, n_2) - m_j^i)^2}} \quad (11)$$

$c_2$  用来控制非线性函数的形状参数,保证增强程度与的系数值相适应。 $N^i$  为  $i$  尺度子带的大小,  $L^i$  为最重要的参数,它的值和尺度有关。

放大所得的图像为  $S(mw, mh)$ , 由公式(1)得出放大图分色后的红绿蓝图像  $R(mw, mh)$ ,  $G(mw, mh)$ ,  $B(mw, mh)$ 。

## 5 图像灰度化

BMP 文件采用 RGB 彩色系统来表示色彩<sup>[2]</sup>,每个像素的色彩信息均由红绿蓝三色分量组成,用 RGB 分别表示红绿蓝分量。YIQ 色彩系统通常被北美的电视系统所采用,这里 Y 是指颜色的明视度,也就是灰度。根据 RGB 彩色系统与 YIQ 系统的关系:

$$Y = 0.299 * R + 0.587 * G + 0.114 * B \quad \text{得到全色图:}$$

$$P(mw, mh) = R(mw, mh) \times 0.299 + G(mw, mh) \times 0.587 + 0.144 * B(mw, mh)$$

得到红、绿、蓝、全色四色图像是 8 位量化的,而 ccd 图像是 10 位量化的,所以必须重新量化<sup>[3]</sup>,图像最低亮度为  $I_0$ ,最高亮度为  $I_1$ ,亮度  $I$ , 8 位量化值为  $i$ , 10 位量化值为  $j$ ,  $s(x) I_i = I_0 * (\frac{I}{I_0})^{\frac{i}{255}}$  (12)

$$I_i = I_0 * (\frac{I}{I_0})^{\frac{i}{1023}} \quad (13) \quad \text{由(12), (13)得 } j = \frac{1023}{255} i ;$$

## 6 实验结果

以上全部算法和设计思路均用 Visual C++ 实现,图 2 预置的是彩色分辨率与全色分辨率之比为 1:16 的 CCD 图像,一幅 BMP 图像(图 a,图中字母 RGB 颜色分别为(255, 0, 0), (0, 255, 0), (0, 0, 255), 背景色(0, 0, 0))分色后得到的红绿蓝色图分别只有原图的红绿蓝色光信息,全色图(图 5 是经过双线性插值放大 16 倍后得到的,图 b、c、d、e 为转换得到的 CCD 图像,非常接近接收 CCD 输出的视频信号数字化后的图像,将其模拟化替代 CCD 进行相机调试起到了预期效果。



图 2 图像仿真实例

参考文献

- 1 郑玉权, 崔敦杰. 用 BMP 图像文件合成多光谱遥感图像的简单方法. 光学精密工程, 1999, 7(2): 25 - 30.
- 2 何斌, 马天予, 王运坚, 朱红莲. Visual C++ 数字图像处理. 第 2 版, 北京: 人民邮电出版社, 2001.
- 3 Foley J D. 计算机图形学及实践 C 语言描述. 第 2 版, 北京: 机械工业出版社, 2004
- 4 张平, 檀结庆, 何蕾. 基于离散小波变换的图像修补方法. 计算机应用研究, 2007, 24(9): 287 - 289.
- 5 Hunt B R. Super resolution of images: algorithm principles performance. International Journal of Imaging Systems and Technology, 1995, 6(4): 297 - 304.
- 6 吴援明, 李天倩. 一种新的图像实时放大技术. 电子与信息学报, 2004, 26(7): 1070 - 1075.
- 7 浦利, 金伟其, 刘玉树. 基于小波双立方配比插值的图像插值放大算法研究. 红外技术, 2006, 28(8): 453 - 455.
- 8 陶洪久, 柳健. 基于小波变换和插值的超分辨率图像处理算法. 武汉理工大学学报, 2002, 24(8): 63 - 66.

(上接第 120 页)

运用控制图上、下控制线公式进行计算可得:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad \bar{\bar{x}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \bar{x}_i$$

$$USL = \bar{\bar{x}} + A_c \bar{R} \quad (式 5-2-1) \quad LSL = \bar{\bar{x}} - A_c \bar{R} \quad (式 5-2-2)$$

利用(式 5-2-1)得:  $USL = 38.77 + 0.577 * 2.99 = 40.49$

利用(式 5-2-2)  $LSL = 38.77 - 0.577 * 2.99 = 37.04$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = 3.24 \quad (\text{分组大小 } n = 5)$$

$$\text{根据以上数据, 求出西格玛水平 } Z = \frac{USL - LSL}{2\sigma} =$$

0.54

如果一个过程的西格玛水平较低, 那么表明它以较低的成本、较短的时间向顾客提供较高质量的产品与服务的能力较低, 因此该过程的竞争力就较低。根据上面六西格玛水平  $Z = 0.54$ , 就可以推断现在的软件的开发团队还有很大的提升空间, 因此, 我们要寻找问题的根本原因, 优化过程消除或减少关键影响的方案, 提高企业的竞争力。

6 总结

六西格玛是一套很好的流程改进的方法, 将其运用到软件行业中将有很好的应用价值与前景。因此针对软件企业的自身特点, 结合六西格玛, 进行软件过程的相关研究具有十分重要的意义。

参考文献

- 1 郭红旗. 六西格玛在软件过程管理中的应用研究. 天津: 天津大学, 2006.
- 2 王金银, 常丹. 六西格玛在软件过程管理中的应用. 科技管理研究, 2005, 25(1): 122 - 124.
- 3 Tayntor C B. 六西格玛软件开发. 北京: 机械工业出版社, 10 ~ 56.
- 4 杨跃进, 商广娟, 郭锐. 统计过程控制技术. 北京: 航空工业出版社, 2003.
- 5 杨海燕, 赵巍, 张力, 等译. 软件度量. 北京: 机械工业出版社, 2004.