

〈图像处理与仿真〉

整数双正交小波图像压缩及其 DSP 实现*

赵秀影^{1,2,3}, 翟林培¹, 魏静元⁴, 刘 红^{1,2,3}

(1. 长春光机所, 航测部, 吉林 长春 130033; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039
3. 空军航空大学, 吉林 长春 130022; 4. 吉林大学 白求恩医学部, 吉林 长春 130022)

摘要: 对于高分辨率相机所成图像, 数据量非常巨大, 仅用软件压缩远远不能满足实时性要求。本文提出一种适于硬件实现图像压缩算法——整数双正交小波变换的提升算法, 并用 DSP (Digital Signal Processing) 芯片实现该种算法。由于输入的图像的灰度值是整数, 为减少误差, 我们把滤波器的参数也设计成整数形式, 这种小波的计算只需两个浮点运算和 16 个整数运算, 降低运算的复杂度, 减少存储空间, 进而提高实时性。并结合 SPIHT 编码方法提高压缩比 (可达到 31.25)。

关键词: 小波变换; DSP; SPIHT

中图分类号: TN911.73 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2005)06-0458-05

Integer Biorthogonal Wavelet Transform on Image Compression

ZHAO Xiu-ying^{1,2,3}, ZHAI Lin-pei¹, WEI Jing-yuan⁴, LIU Hong^{1,2,3}

(1. Graduate School of the Chinese Academy of Science, Beijing 100039, china;

2. Changchun Institute of Optical fine Mechanics and Physics, Jilin Changchun 130033, China;

3. Aviation University of Air Force, Jilin Changchun 130022, China; 4. Jilin University, Jilin Changchun 130022, China)

Abstract: For high-resolution camera, the amount of data is very huge, it is impossible to satisfy the request of real time only by using software. Therefore, we proposed a kind of compression algorithm——Integer Biorthogonal wavelet lifting scheme, and its DSP realization which is suitable for the hardware realization (DSP realization). In most of the cases, the filters all have some parameter of float point, used in wavelet transforms. But the input image have integer scale value, if the filter's output no longer consists of integers, data losses will result from rounding. To minish the errors, it is necessary to make a reversible mapping between an integer image input and an integer wavelet representation. An integer version of every wavelet transform employing finite filters can be built with a finite number of lifting steps. This kind of calculation of wavelet needs only two float operations and 16 integral operations. Those combinations can lower the operation's complications, and reduce the saving spaces. Then realize real-time of the image compression. The combination of wavelet lifting scheme and SPIHT lift the compression ratio to 31.25.

Key word: wavelet transform; DSP; SPIHT

引言

小波变换理论是近几年兴起的崭新的时频域分析理论, 得到了学者们的广泛重视, 其离散小波变换 (DWT) 的快速算法更成为人们研究的热点。尽管快速小波变换算法 (即 Mallat 算法) 在图像压缩编码领域得到了普遍关注, 但在实际应用中, 仍不难发现其自身存在的弱点: 1) 快速小波变换过程中, 需要与庞大的图像数据作卷积运算, 计算复杂; 2) 内存需求量较大; 3) 对图像的尺寸有要求, 并不能对所有尺寸图像进行变换。为此, 本文将引入另外一种快速小波变换实现算法——“提升 (lifting)” 算法。快速提升小波变换算法的基本思想是,

* 收稿日期: 2005-06-06; 修订日期: 2005-07-15; 基金项目: 国防基金项目

将 Mallat 算法中的每一级滤波运算分解为分裂 (split)、预测 (predict) 和更新 (update) 三个过程。这是一种不依赖于傅立叶变换的新的的小波构造方法——提升方法 (Lifting Scheme), 由于其计算复杂度只是原有卷积方法的一半左右, 因而成为计算离散小波变换的主流方法。提升方案的特点是: 1) 继承了第一代小波的多分辨率的特性; 2) 不依赖傅立叶变换; 3) 提升方案允许完全的原位计算, 即在小波变换中不需附加内存, 原始信号数据可以直接被小波系数代替; 4) 提升的反变换可以很容易由正变换得到, 即只需改变数据流的方向和正负号。

1 基于双正交小波构造定理

设有限长度滤波器在分解端与重构端的低通滤波器函数分别为:

$$H(\mathbf{w}) = \sum_{n=-N_1}^{N_2} h_n e^{-i\mathbf{w}n} \quad (1)$$

$$G(\mathbf{w}) = \sum_{n=-M_1}^{M_2} g_n e^{-i\mathbf{w}n} \quad (2)$$

Cohen, Daubechies 与 Feauveau 通过建立 $H(\mathbf{w})$ 与 $G(\mathbf{w})$ 的关系, 得到一组构造双正交小波滤波器的充分条件。为叙述方便, 将双正交小波构造定理重述如下:

定理: 设 $H(\mathbf{w}) = \sqrt{2} \left[(1 + e^{-i\mathbf{w}}) / 2 \right]^N P(\mathbf{w})$, $G(\mathbf{w}) = \sqrt{2} \left[(1 + e^{-i\mathbf{w}}) / 2 \right]^{\bar{N}} \bar{P}(\mathbf{w})$, 其中 $P(\mathbf{w})$ 、 $\bar{P}(\mathbf{w})$ 为关于 $e^{-i\mathbf{w}}$ 的多项式, 若满足下述条件: 1) 归一化: $H(0) = \sqrt{2}$, $G(0) = \sqrt{2}$ 。2) $\sup_{\mathbf{w} \in [0, 2\pi)} |P(\mathbf{w})| < 2^{N-1}$, $\sup_{\mathbf{w} \in [0, 2\pi)} |\bar{P}(\mathbf{w})| < 2^{\bar{N}-1}$ 。

$H(\mathbf{w})G(\mathbf{w} + \delta) + H(\mathbf{w} + \delta)G(\mathbf{w}) = 2$ 几乎处处成立。

则 $H(\mathbf{w})$ 与 $G(\mathbf{w})$ 构造出一对双正交小波滤波器。

在实际应用中, 为了减少运算量, 滤波器长度不宜过大。本文中的小波构造为具有对称结构且分解与重构端的滤波器长度分别为 9 与 7 的双正交小波滤波器, 其中正、反消失矩 $N = \bar{N} = 4$ 。

2 小波提升方案的基本原理

小波提升方案包括 3 个处理步骤: 分裂 (Split)、预测 (Predict) 和更新 (Update)。

具体方案如下:

分裂过程是将信号 X 分裂成为两个子集, 通常是将一个数列分为偶数序列和奇数序列; 预测过程是针对数据之间的相关性, 用 X_e 与一个数据集结构无关的预测算子 P 去预测 X_0 , 然后用预测值与 X_0 的差来代替 X_0 , 即 $d = X_0 - P(X_e)$; 为了使 X_e 的整体性质 (如均值) 与原数据中的性质一致, 需要采用更新过程, 其目的是通过更新算子 U 产生一个更好的子数据集 S , 使之保持原数据集 X 的一些特性, 即:

$$s = X_e + U(d) \quad (3)$$

整个的提升过程可以简单的描述如下:

$$X = X_0 + X_e, \quad d = X_0 - P(X_e), \quad s = X_e + U(d) \quad (4)$$

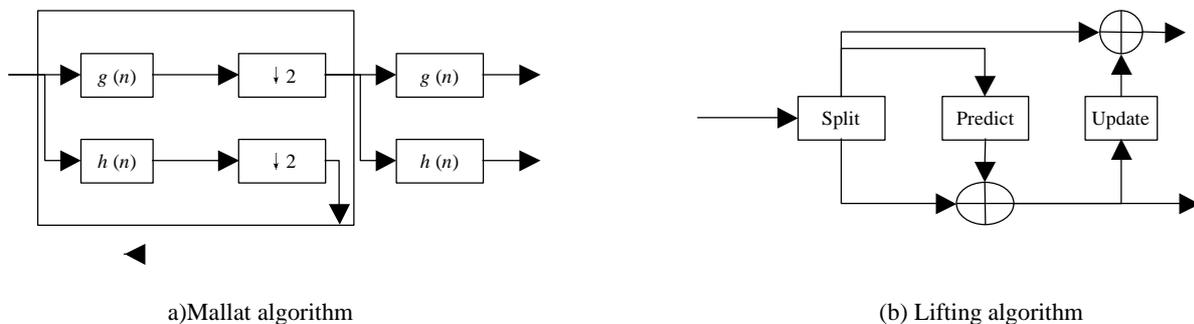


图 1 Mallat 小波分解与提升方案小波分解示意图

Fig.1 Mallat wavelet decomposition and wavelet decomposition based on lifting scheme

2.1 提升算法实现

提升方法，实现如下：

第一步： $Y(2n+1) = X_{\text{ext}}(2n+1) + a(X_{\text{ext}}(2n) + X_{\text{ext}}(2n+2))$, $i_0 - 3 \leq 2n + 1 < i_1 + 3$

第二步： $Y(2n) = X_{\text{ext}}(2n) + b(Y(2n-1) + Y(2n+1))$, $i_0 - 2 \leq 2n < i_1 + 2$

第三步： $Y(2n+1) = Y(2n+1) + g(Y(2n) + Y(2n+2))$, $i_0 - 1 \leq 2n + 1 < i_1 + 1$

第四步： $Y(2n) = Y(2n) + d(Y(2n+1) + Y(2n-1))$, $i_0 - 2 \leq 2n < i_1$

第五步： $Y(2n+1) = -KY(2n+1)$, $i_0 \leq 2n + 1 < i_1$

第六步： $Y(2n+1) = Y(2n)/K$, $i_0 \leq 2n < i_1$

其中， i_0 , $i_1 - 1$ 分别表示输入一行（或列）数据的开始索引和最后索引。小波逆变换正好和正变换相反，实现起来相当方便，这也是提升方法的突出优点。

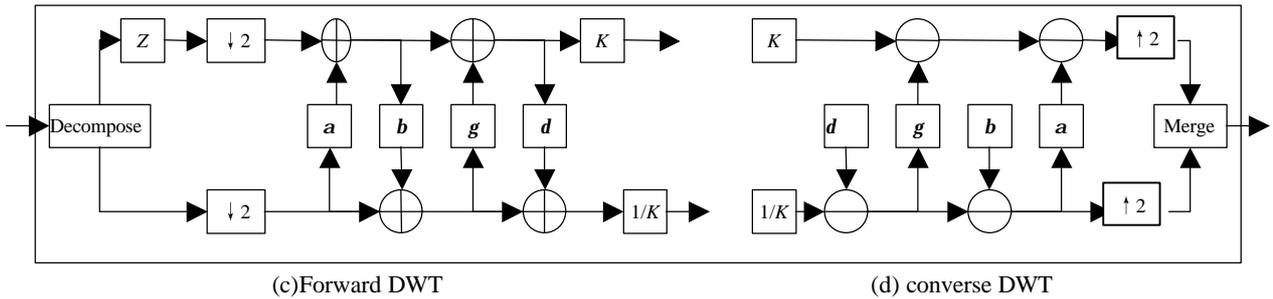


图 2 提升方案小波分解和重构示意图

Fig.2 Wavelet decomposition and reconstruction process based on lifting scheme

2.2 把乘法操作优化为移位加操作

由于乘法器占用很大的硬件资源,不利于芯片实现,且鉴于小波滤波器的系数是固定的,我们把乘法操作优化为移位寄存器和加法器操作,先把滤波器小波系数量化为:

$$a = -3/2, \quad b = -1/16, \quad \gamma = 4/5, \quad \delta = -15/32, \quad K = 4\sqrt{2}/5, \quad 1/K = 5\sqrt{2}/8 \quad (5)$$

2.3 硬件结构

从 CCD 相机接口送出的数据为 LVDS 形式,转换成 TTL 电平后,通过像素时钟信号的控制把 TTL 电平图像数据存储到同步 FIFO 内。当 FIFO 出现半满标志时立即以中断方式通知 DSP1 到 FIFO 读取数据,同时在 FIFO 另一端继续存储图像数据,并一直以这种方式存取数据。当 DSP1 收到中断后立即从 FIFO 中读数,读取完毕后把图像数据进行初步处理后并存储到 SDRAM 中,等待进一步处理。

当 DSP1 接收完毕一帧数据并进行处理后立即储存到 DPRAM1 中并发中断通知 DSP2 读数以及压缩编码,DSP2 接收到数据后进行快速压缩编码,压缩后的数据存到 DPRAM2 中,同时 CPLD 读取 DPRAM2 内的压缩数据并把并行数据转换为 3.2 MB/s 的串行数据,则最高的图像压缩倍率为 100 MB/3.2 MB=31.25 倍。从 CPLD 出来的串行数据为 TTL 电平信号,由于信息传输速率达到 25.6 Mb/s。则采用 LVDS 传输方式比较可靠。它是一种小振幅差分信号技术,容许传输率达到每秒数百兆比特位。由 TTL 转为 LVDS 后进行传输。

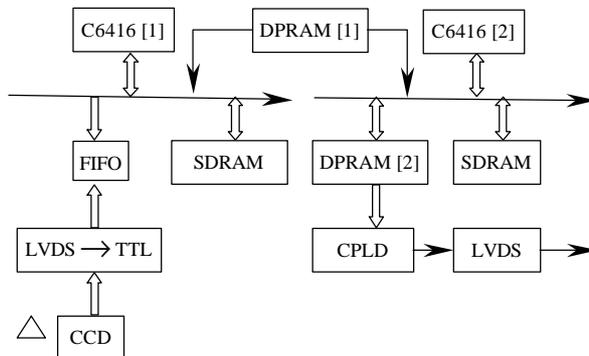


图 3 基于双 DSP 架构的高分辨率图像压缩卡硬件结构原理图

Fig.3 Principle of compression ware in high-resolution camera based on two DSP

3 适于硬件实现的 SPIHT 编码

SPIHT 编码需要附加使用 3 个集合链表 LIS (list of insignificant sets)、LIP (list of insignificant pixels) 和 LSP (list of significant pixels) 来存储已编码信息 (已编码过的节点和集合), 将某一树结点及其所有后继结点划归为同一集合, 继而采用适当的集合分割排序策略, 通过初始化、排序扫描 (sorting pass)、细化扫描 (refinement pass) 和量化步长更新这 4 个子过程完成嵌入编码。SPIHT 编码算法[3]使用了零树集合定义: $O(i,j)$ 表示节点 (i,j) 的直接后继节点 (即 4 个子女节点) 的坐标集合; $D(i,j)$ 表示节点 (i,j) 的所有后继节点的坐标集合; $L(i,j)$ 表示节点 (i,j) 的除直接后继以外所有后继节点的坐标集合, 即 $L(i,j) = D(i,j) - O(i,j)$ 。LIS 表示不重要集合列表 (待编码集合); LIP 表示不重要像素集合列表; LSP 表示重要像素集合列表。其具体描述如下, 其中 $S_n(\cdot)$ 定义为:

$$S_n(\Gamma) \begin{cases} 1 & \text{if } \max_{(i,j) \in \Gamma} \{c_{ij}\} \geq 2^n \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (6)$$

1) 初始化

输出 $n = \left\lceil \log \left(\max_{(i,j)} \{c_{i,j}\} \right) \right\rceil$, 将 LSP 设置为空表, 将所有最高层节点 (i,j) 放入 LIP 表中, 并将其中有后继节点的节点放入 LIS 表中, 同时标以 A 类。

2) 排序过程

对于 LIP 表中所有节点 (i,j) : (1) 输出 $S_n(i,j)$; (2) 如果 $S_n(i,j) = 1$, 则将节点 (i,j) 移到 LSP 表中并输出 C_{ij} 的符号;

对于 LIS 表中所有节点 (i,j) : 1) 如果该节点属于 A 类, 则: (1) 输出 $S_n(D(i,j))$; (2) 如果 $S_n(D(i,j)) = 1$, 则对 $O(i,j)$ 中所有节点 (k,l) : (a) 输出 $S_n(k,l)$; (b) 如果 $S_n(k,l) = 1$, 则将节点 (k,l) 加入到 LSP 表中并输出 $C_{k,l}$ 的符号; (c) 如果 $S_n(k,l) = 0$, 则将节点 (k,l) 加入到 LIP 表中; (2) 如果 $L(i,j)$ 非空, 则将节点 (i,j) 移到 LIS 表的尾部, 并以 B 类标之, 转移至 (3); 否则, 将节点 (i,j) 移出 LIS 表; 2) 如果该节点属于 B 类, 则: (1) 输出 $S_n(L(i,j))$; (2) 如果 $S_n(L(i,j)) = 1$, 则将节点 (i,j) 的 4 个直接后继节点以 A 类型加入到 LIS 表中; (3) 将节点 (i,j) 移出 LIS 表。

3) 细化过程

对于 LSP 表中所有节点 (i,j) , 除去那些在最后一次排序过程中出现的节点, 输出 $|C_{ij}|$ 的第 n 个最重要位。

4) 量化步长更新

将 n 减 1, 转移至 2)。

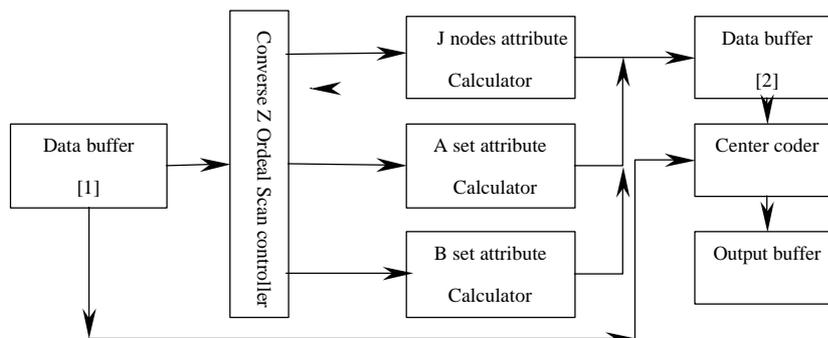


图 4 SPIHT 算法硬件实现结构

Fig.4 SPIHT's design of hardware

4 结论

本文介绍了一种高速传输的高分辨率图像压缩系统的设计和硬件实现方案。在传统 Daubechies 9/7 和 SPIHT 算法的基础上, 针对硬件实现作了一定的改进, 在硬件体系结构和处理速度上具有较大的优势。系统采用集成

化设计，硬件结构简单、可靠，达到了对帧尺寸：4096×3072 的连续图像数据流进行高速实时压缩的系统设计

目标。这套理论我们把它采用 DSP 实现并成功应用于某型号大型 CCD 相机，获得了很大的压缩比和很好的视觉恢复图像。如果对系统的硬件体系结构略作调整，提高算法的并行流水处理，还能对更高帧频的高速传输图像数据流进行实时压缩。



图 5 装入压缩卡的大型 CCD 相机所成图像的一部分
Fig.5 A part of image produced by large-scale CCD camera

参 考 文 献

- [1] 钟广军, 成礼智, 陈火旺. 基于提升方法的简单 9/7 小波滤波器[J]. 计算机工程与科学. 2003, 25(1): 35~37.
- [2] 王向阳, 杨红颖. 基于人眼视觉特性的快速图像编码方法[J]. 软件学报. 2003, 14(11): 1964~1970.
- [3] 兰小旭光, 郑南宁, 吴 勇, 等. JPEG2000 二维离散小波变换高效并行 VLSI 结构设计[J]. 西安交通大学学报. 2004, 38(2): 149~153.
- [4] Wim Sweldens. The Lifting Scheme: A Construction Of Second Generation Wavelets[R]. 1991 Mathematics Subject Classification. 42C 15. *SIAM Journal on Mathematical Analysis*. 1996.
- [5] Arthur da Cunha, Minh N. Do. Biorthogonal Two-channel Filter Banks with Directional Vanishing Moments: Characterization, Design and Applications[R]. *IEEE Transactions On Image Processing*. 2004.
- [6] 钟录宏, 康日新, 李 文. 嵌入式编码在图像检测系统中的应用研究[J]. 红外技术. 2003, 25(2): 29~32.

作者简介：赵秀影（1972—），女，汉，辽宁铁岭市人，博士生，讲师，主要研究工作是机械电子与信息处理。