

基于提升的二维离散小波变换优化算法与 DSP 实现

印 勇, 谭 勇

(重庆大学 通信工程学院, 重庆 400030)

摘 要:二维离散小波变换是小波处理图像的关键算法。随着人们对多媒体信息需求的日益增长,处理速度正变得越来越重要,传统的先后列式的二维离散小波变换计算方法具有变换速度慢,不能充分利用硬件设备的缺点。讨论了一种基于小波提升算法的、行列并行的二维离散小波变换改进算法,该算法具有运算速度快、占用内存少的特点,特别适用于嵌入式系统的需求。同时,基于 TMS320C6000 DSP 平台讨论了它的软件实现方法,经比较可比传统计算方法提高效率 20% 左右。

关键词:小波变换;提升算法;行列并行;数字信号处理器

中图分类号:TP301.6

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2007)03-0055-03

An Optimized Two-Dimension Discrete Wavelet Transform Algorithm Based on Lifting Scheme and Implementation on DSP

YIN Yong, TAN Yong

(School of Communication Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract:Two-dimension discrete wavelet transform is the key algorithm for wavelet image processing. Due to increasing demand on multimedia information, processing speed becomes much more critical. Traditional way of calculation is slow and causes inefficient utilization of hardware. Discusses an optimized two-dimension discrete wavelet transform based on lifting scheme, which transforms column data and row data simultaneously. It is much faster and less memory demanding, which benefits relevant embedded systems. Besides, software implementation on TMS320C6000 DSP is given and some 20% efficiency is achieved compared with traditional method.

Key words:wavelet transform; lifting scheme; row-column parallel calculation; DSP

0 引 言

随着人们对多媒体信息需求的日益增长,数码相机、移动电话、MP4 等多媒体信息处理系统蓬勃发展。基于通用 DSP 处理器的此类系统设计以灵活性强、扩展性好、可升级和易维护的优点成为系统开发的首选方案。但是此类系统中,信息处理的计算复杂度往往很高,即使采用高速 DSP 处理器,也必须对信号处理算法进行优化,才可能充分发挥 DSP 芯片并行快速的优良性能。

由于良好的时频局部特性和多分辨分析特性,小波已广泛应用于图像处理领域,并且被吸收进新的一些国际标准中成为了标准算法。文中讨论了一种基于小波提升算法的、行列并行的二维离散小波变换改进算法,该算法具有运算速度快、占用内存少的特点,可充分利用硬件资源,特别适用于嵌入式系统的需求。

1 小波变换提升算法基本原理

1994 年 Sweldens 提出了小波的提升算法^[1],有效地解决传统的基于 Mallat 的塔式分解小波变换算法计算量大、对存储空间的要求高的问题,从算法方面提高了小波变换的实现效率。

一维一阶段提升格式小波变换结构如图 1 所示,整个过程分为分裂(split)、预测(predict)和更新(update)3 个步骤^[2]。通过预测算子可以得到高频信息,而通过更新算子得到低频信息。

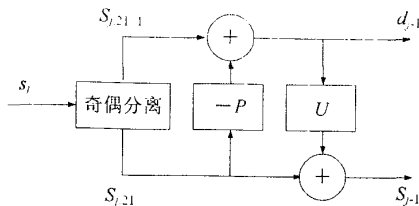


图 1 一阶段提升格式小波变换结构图

令 S_i 是输入信号, $-P$ 和 U 分别是预测算子和更

收稿日期:2006-06-19

作者简介:印 勇(1963-),男,重庆人,博士,副教授,研究方向为智能信号处理、图像处理等。

新算子,则有:

(1) 分裂:此过程是将信号 S_j 分裂成两个互不相交的子集 $S_{j,2l}$ 和 $S_{j,2l+1}$,即:

$$S_{j,2l} = \text{even}(S_j) \quad (1)$$

$$S_{j,2l+1} = \text{odd}(S_j) \quad (2)$$

(2) 预测:针对数据间的相关性,采用一个与数据结构无关的预测算子 P 。预测过程的表达式如下:

$$d_{j-1} = S_{j,2l+1} - \text{int}[P(S_{j,2l})] \quad (3)$$

(3) 更新:由于第 1 步生成的偶信号 $S_{j,2l}$ 在某些整体性质上并不和原始数据一样,因此需要采用更新的过程。故引入更新算子 U 通过对 $S_{j,2l}$ 作预测以生成更好的子数据集,并保持 S_j 的一些特性。 S_{j-1} 的定义如下:

$$S_{j-1} = S_{j,2l} + \text{int}[U(d_{j-1})] \quad (4)$$

这里预测滤波器 $P(S_{j,2l}) = \sum_i p_{j,i} S_{j,2l}$,更新滤波器 $U(d_{j-1}) = \sum_i u_{j-1,i} d_{j-1,2l+1}$, $\text{int}[x]$ 是对 x 四舍五入取整。这样提升算法就可以容易实现从整数到整数映射的小波变换。而且这些过程都是可逆的,这样,整数提升小波变换可以实现真正意义上的图像的无损压缩。

一次提升小波变换有低通分量和高通分量输出,可以根据用户的要求调整尺度 j 以调整图像的分辨率,进行进一步的分解实现,实现质量可分级的目标。

2 优化的二维离散小波变换原理

小波处理图像时需要进行二维离散小波变换。当采用提升算法时,可以采用两级一维提升算法级联进行,即把图像数据的 $N \times N$ 矩阵先看作一 N 行数组,采用提升算法,进行行变换,输出的结果仍为 $N \times N$ 矩阵,再将其看作 N 列数组,进行列变换,从而完成二维变换,得到最终变换结果^[3]。这种方法原理简单,易于实现,但是,其缺点在于,当所有行变换未完成时,不能进行任何一列的变换,导致变换时间的冗长和硬件设备的空闲。

仔细提升算法的提升流程如图 2^[4] 所示,图中圆圈内的数字表示信号数据的序号,其中,第一行为原始数据 X ,第二行和第三行为变换后的数据 Y 。可以看出,采用提升算法进行变换,可以直接通过原始数据 X 计算奇序数的变换后数据 Y_o ,例如,要得到 $Y(1)$,就需要有 $X(0)$, $X(1)$ 和 $X(2)$ 的数据作为变换模块的输入。而如果要计算偶序数变换值 Y_e ,需首先得到相邻奇序数数据的变换值 Y_o 。例如,如要想得到 $Y(2)$,就必须有 $Y(1)$, $Y(3)$ 和 $X(2)$ 的数据处于变换模块的输入端口。同样对于列,当得到同一列的相邻三行数

据的行变换结果之后,就可以进行一次列变换。例如在得到 $Y(0,0)$, $Y(1,0)$ 和 $Y(2,0)$ 后,就可以计算 $Z(1,0)$,它是二维离散小波变换后处于 $(1,0)$ 位置上的最终结果。

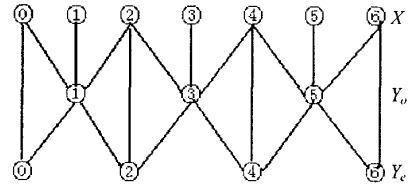


图 2 一阶段提升格式小波流程图

所以可以不再完整地进行每一行的行变换后,再开始下一行的变换,而是将行变换按照列的方向进行,即每进行 3 个同行相邻列序数数据的行变换,就转入下一行中同样是这三个列序数数据的行变换,直到所有行的三个连续列序数数据变换完成,这样,就得到了两列完整的行变换结果。在进行新的三个列序数原始数据行变换同时,就可以开始已得到的两列数据的列变换了,而列变换算法可以按照普通方法进行,即完整处理一列数据后,再处理下列数据,该并行运算过程如表 1 所示。

表 1 元素并行计算表

行计算单元读入原始数据 X	行计算单元计算 Y	列计算单元读入 Y	列计算单元计算 Z
X(0,2)	用 X(N-1,0), Y(N-1,1) 计算 Y(N-1,0)		
X(0,3)		读入 Y(0,0)	
X(0,4)	用 X(0,2), X(0,3) X(0,4) 计算 Y(0,3)	读入 Y(1,0)	
X(1,2)	用 X(0,2), Y(0,3) Y(0,1) 计算 Y(0,2)	读入 Y(0,1)	
X(1,3)		读入 Y(2,0)	用 Y(0,0), Y(1,0) Y(2,0) 计算 Z(1,0)
X(1,4)	用 X(1,2), X(1,3) X(1,4) 计算 Y(1,3)	读入 Y(3,0)	用 Y(0,0), Z(1,0) 计算 Z(0,0)
X(2,2)	用 X(1,2), Y(1,3) Y(1,1) 计算 Y(1,2)	读入 Y(1,1)	
X(2,3)		读入 Y(4,0)	用 Y(2,0), Y(3,0) Y(4,0) 计算 Z(0,0)
X(2,4)	用 X(2,2), X(2,3) X(2,4) 计算 Y(2,3)		用 Y(2,0), Z(3,0) Z(1,0) 计算 Z(2,0)
...

表 1 中 X 为原始数据, Y 为行变换后的数据, Z 为列变换后的数据,系统从 X 中读入表中所示序号数据,进行行变换,得到 Y ;系统从 Y 中读入数据,进行列变换,得到 Z 。最后当行变换已经全部完成,列变换剩余 $N-2$ 和 $N-1$ 两列,采用普通算法,每个读数周期都可以得到一个变换结果,计算出这两列的列变换结果,从而最终完成一级变换。

对于一个 $N \times N$ 图像,无论是行变换,还是列变换,如果把读取 3 个输入数,计算得到两个结果,存储

两个结果值作为一个计算过程单元,那么,在沿着列向的对行元素进行的 N 个计算单元的同时,实际上对与前面已经准备好的两列元素完成列向小波变换则需要 $(N/2) * 2$ 个计算单元,所以行变换的速度和列变换的速度是一样的,中间没有延迟。但是在通常情况下,行变换所需的 X 常常会位于外部存储器,而计算的临时结果 Y 则常常位于片内的存储器或寄存器单元,所以由于不同位置处存储器的存取速度的不同,行变换单元的处理速度会落后于列处理单元,所以需要使用信号量来同步行列处理单元的操作,保证列变换所需要的数据已经由行变换单元准备好。

3 优化算法在 DSP 上的实现

TMS320C6000 系列 DSP 是美国 TI 公司于 1997 年推出的新一代高性能的数字信号处理芯片,具有很高的工作频率和极强的并行处理能力^[5]。片内有 A,B 两组共 8 个并行处理单元,每组内分为 L,M,D,S 四个单元,每组处理单元结合同侧的寄存器组和数据通道,构成了一个完整的数据处理单元,显然 C6000 处理器具有两个这样的完整单元,并且两个完整的数据处理单元之间可以通过两条数据交叉通路进行数据交叉访问,所以这样的硬件结构非常适合实现数据的并行处理,利于实现数据实时处理。

JPEG2000 推荐 Daubechies(9,7)小波用于图像的有损压缩^[6,7],该小波通过二个预测、更新环节完成一维提升,过程如图 3 所示^[8]。

Daubechies(9,7)具有 $\alpha = 1.5861343$, $\beta = 0.0529801$, $\gamma = 0.8829110$, $\delta = 0.4435068$ 四个提升参数,它们都是浮点数,为利于 DSP 实现,首先将它们转化为定点数,采用 Q15 格式:

$$\alpha = (\text{int})(1.5861343 * (1 << 15) + 0.5) = 51974$$

$$\beta = (\text{int})(0.0529801 * (1 << 15) + 0.5) = 1736$$

$$\gamma = (\text{int})(0.8829110 * (1 << 15) + 0.5) = 28931$$

$$\delta = (\text{int})(0.4435068 * (1 << 15) + 0.5) = 14533$$

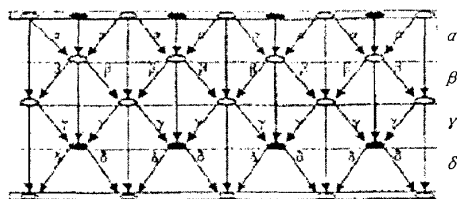


图3 Daubechies(9,7)提升流程图

图像的像素灰度值都是整数,并且提升算法本身可以实现整数到整数的运算,这样就完全避免了耗时的浮点运算过程。然后开始行和列的提升过程。CCS IDE 具有很强的数据流分析能力,能够自动分析前后程序间的数据依赖关系,并将没有依赖关系的程序分配到不同的计算单元同时执行,此外,还可人为地在程序设计时有意识地减少前后邻近程序段间的数据依赖和指定计算单元,使计算效率进一步提高。因此在该类 DSP 上实现行列并行的二维离散小波变换算法具有极大的优越性。一次预测更新环节部分的 C 代码如下:

```
* high = ptr[1] - MULT(C_ Alpha, (ptr[0] + ptr[2])); 预测
```

```
* low = ptr[0] - MULT(C_ Beta, (high[0] + high[0])); 更新
```

对应的优化汇编代码为:

```
MV .S2X A0,B8
```

```
MV .S2X A5,B5
```

```
MV .L2X A8,B6
```

```
.....
```

```
|| MVC .S2 CSR,B1
```

```
SUB .S2X A4,4,B4
```

```
|| MVK .S1 1736,A3
```

```
|| AND .L2 -2,B1,B9
```

```
MV .S1X B0,A1
```

```
|| SUB .D1 A4,4,A4
```

```
|| MV .L2X A3,B7
```

```
|| MVC .S2 B9,CSR
```

```
.....
```

可见,该算法在该平台上产生了并行性很强的代码,因此具有很高的实现效率,采用 256×256 的黑白 8bit 的 Lena 图像为测试图像(如图 4 所示),在 CCS2.0 使用 simulator 时,有 profiler 工具测得完成一次三级 9/7 小波变换的时间为 57.71ms,由文献[8]可得到同样情况下当采用先行后列算法的耗时约为 73ms,提高效率 20.9%,另外对 Baboon 图像作测试,提高效率 22.6%,可见该优化算法是有效的(如图 5 所示)。此外,该算法使得在整个运算过程中不需要将全部图像数据都装入内存,但是处理器频繁地将数据从片外存储器读入片内将一定程度上降低效率。

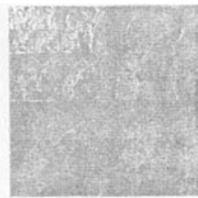


图4 Lena原图像

图5 Lena的三级变换图像

(下转第 61 页)



图4 三类图像序列

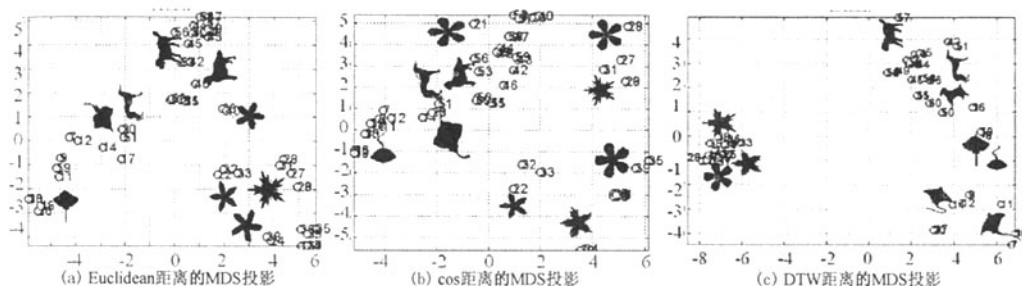


图5 三种距离的MDS投影

参考文献:

- [1] Chang C C, Hwang S M, Buehrer D J. A shape recognition scheme based on relative distances of feature points from the centroid[J]. Pattern Recognition, 1991, 24 (11): 1053 - 1063.
- [2] Teague M R. Image analysis via the general theory of moments [J]. Optical Society of America, Journal, 1980, 70(8): 920 - 930.
- [3] Dudani S A, Breeing K J, McGhee R B. Aircraft identification by moment invariants[J]. IEEE Trans Computers, 1977, C-26(1): 39 - 46.
- [4] Zahn C T, Roskies R Z. Fourier Descriptors for Plane Closed Curves[J]. IEEE Trans Computers, 1972, C-21: 269 - 281.
- [5] Dubois S R, Glanz F H. An auto regressive model approach to two - dimensional shape classification[J]. IEEE Trans on PA-MI, 1986, 8: 55 - 56.
- [6] Wallace T P, Wintz P A. An Efficient Three - Dimensional Aircraft Recognition Algorithm Using Normalized Fourier Descriptors[J]. Computer Graphics and Image Processing, 1980, 13: 99 - 126.
- [7] Bartolini I, Ciaccia P, Patella M. WARP: Accurate Retrieval of Shapes Using Phase of Fourier Descriptors and Time Warping Distance[J]. IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell, 2005, 27 (1): 142 - 147.
- [8] McConnell R, Kwok R, Curlander J C, et al. Ψ -s correlation and dynamic time warping: Two methods for tracking ice floes in SAR image[J]. IEEE Trans Geoscience and Remote Sensing, 1991, 29(6): 1004 - 1012.
- [9] Lu Hanqing, Songde M A. Representation of feature point and error analysis[R]. Beijing: Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, 1993.

(上接第 57 页)

4 结束语

文中讨论的行列并行计算的二维离散小波变换优化算法,在具有并行结构的处理器上实现时具有较大应用价值,不仅提高了运算速度,同时减少了运算时的内存需求。对于包含图像处理和多媒体功能的嵌入式产品开发具有很强的实用价值。

参考文献:

- [1] Sweldens W. The lifting scheme: a construction of second generation wavelets[J]. SIAM J Math Anal, 1997, 29(2): 511 - 546.
- [2] Sweldens D W. Factoring wavelet transforms into lifting steps [J]. Fourier Anal Appl, 1998, 4(3): 247 - 269.
- [3] Chrysafis C, Ortega A. Line based reduced memory, wavelet image compression[J]. IEEE Transaction on Image Processing, 2000, 9(3): 378 - 389.
- [4] 孟 军. 基于提升算法离散小波变换的静止图像编码系统实现[D]. 南京: 东南大学, 2003.
- [5] 李忠锋. 基于 C6000 DSP 的 JPEG2000 图像压缩技术研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2004.
- [6] ISO/IEC15444 - 1 (ITU Recommendation T. 800) JPEG 2000 Image Coding System[S]. 2003.
- [7] 许宪东, 安 波, 王亚东. 基于 JPEG/JPEG2000 的静态图像编码技术[J]. 哈尔滨师范大学学报, 2004(3): 69 - 71.
- [8] 夏 怡. 第二代小波在 JPEG2000 中的应用[J]. 计算机与现代化, 2005(9): 21 - 24.