

基于小波变换的图像压缩改进方法及其应用

蒲亚坤, 丛爽

中国科学技术大学自动化系, 合肥 230026

摘要 小波提升格式是一种新的双正交小波构造方法, 能够有效地减少小波变换的运行时间。嵌入式零树小波 (EZW) 编码算法利用小波变换后的数据分布特性, 能够实现图像的渐进传输, 是最有效的小波编码方法之一。由于 EZW 算法对低频数据和高频数据采用同样的方法进行编码, 使得在压缩率较高的情况下低频数据损失较大, 因而降低了复原图像的质量。EZW 算法同时还不同程度地存在着空间和时间复杂度过高的问题。针对这两个问题, 进行了 3 个方面的改进: 首先, 将低频数据调整到 $[0, 255]$ 之间后直接存储; 其次, 通过设置标记矩阵记录编码位置, 以此取代主表和副表, 并对每一个重要系数同时进行主扫描和副扫描; 最后, 对高频数据, 将副扫描中重要系数的精度提高一个比特。将整数提升格式的小波变换算法和改进 EZW 编码相结合, 并应用于一个实际的机械臂远程控制系统中, 结果显示, 新算法的实验结果与原系统中基于 DCT 图像压缩方法的结果相比, 前者在恢复图像质量和运行时间上都显示出优越性。

关键词 图像压缩; 小波变换; 提升格式; 嵌入式零树小波; 远程视觉控制

中图分类号 TP751

文献标识码 A

文章编号 100-7857(2009)18-0028-05

Improved Image Compression Method Based on Wavelet Transform and Its Application

PU Yakun, CONG Shuang

Department of Automation, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China

Abstract The lifting scheme is a new bi-orthogonal wavelet constructing method, which can effectively reduce wavelet run time. The Embedded Zero-tree Wavelet (EZW) coding algorithm makes a full use of data distribution characteristics after wavelet transform, can realize progressive image transmission and is one of the most effective image coding methods. Yet, in the EZW algorithm, low-frequency and high-frequency data are coded by the same process, which would result in the loss of more important low-frequency data in the case of a high compression ratio. Significant loss of low-frequency data would lead to a poor recovery image quality. Furthermore, the EZW algorithm has problems of space complexity

as well as temporal complexity. In view of those problems, this paper proposes three improvement methods. First, the low-frequency data are adjusted to the range of $[0, 255]$ and then are saved directly. Second, a marking matrix is set up to track the coding position, instead of the dominant table and subsidiary table in the original process. Meanwhile, the dominant and subsidiary scans are carried out for each important coefficient simultaneously. Last, one more bit of precision to the important coefficients is added in the process of the subsidiary scan. The improved EZW and the integer lifting wavelet transform are combined and applied to a practical remote vision control system of a robot arm. The two results of image compression based separately on wavelet transform and DCT are compared and the proposed method shows better performance on both the recovery quality and running time.

Keywords image compression; wavelet transform; lifting scheme; Embedded Zero-tree Wavelet; remote vision control

0 引言

随着计算机网络和多媒体技术的快速发展, 图像压缩编码技术的应用范围日益增加, 人们对图像通信的质量和功能提出了更高的要求, 希望能用有限的空间和带宽来存储、传

收稿日期: 2009-05-06

基金项目: 国家自然科学基金项目 (60774098)

作者简介: 蒲亚坤, 研究方向为图像压缩与传输, 电子信箱: yakunpu@mail.ustc.edu.cn; 丛爽 (通信作者), 教授, 研究方向为先进控制策略在运动控制中的应用与实现、人工神经网络、智能控制及量子系统控制等, 电子信箱: scong@ustc.edu.cn

输更大尺寸的图像,并可根据实际需要获得不同分辨率或质量的重构图像。传统的基于 DCT 变换的图像压缩虽然在较高码率下能够提供较好的图像质量,但在码率低于 0.25 bpp 时,重构图像存在严重的方块效应;同时,许多情况下希望在单一码流中实现图像的有损和无损压缩,从而实现从有损到无损的累进式传输,而基于 DCT 的压缩算法难以实现这一要求。

针对以上问题,近年发展起来的离散小波变换(DWT)方法,越来越成为图像压缩领域的研究热点。DWT 的一些优良性能使得它成为 JPEG 2000 的核心编码技术。首先,DWT 变换本身可以实现对图像的多分辨率表示,便于支持图像的多分辨率分级传输;其次,DWT 的全图(full-frame)性可在较大范围内消除图像的相关性,并可避免低码率压缩时分块 DCT 编码的块效应;而且,采用整型 DWT 滤波器可以在单一码流中实现有损和无损压缩。

通过对某一固定函数伸缩和平移来构造小波基的小波称为第一代小波,通过提升格式构造的小波称为第二代小波^[1]。第二代小波的基本思想是建立在双正交小波和完全可恢复滤波器组的理论基础上,在保持小波双正交特性的条件下,通过提升和对偶提升过程改善小波性能。提升的方法是基于空域的,其小波基的构造不依赖于傅里叶变换,也不需要频谱分析工具,因此可以在非平移不变区域上按所需小波性能(如正规性、消失矩和小波形状等)自由构造小波,非常适合整数到整数的变换。提升小波为小波基的构造提供了更大的自由度,同时设计方法简单并能加快小波变换的执行速度。由于小波变换采用有限长滤波器,计算小波系数时只需要缓存覆盖滤波器长度的相应行或列的数据,节省内存空间。

Shapiro^[10]根据小波分解后同方向子带中的小波系数存在的相似性,利用一种称为小波树的树形结构来组织这些小波系数,设计了嵌入式零树小波编码方法(Embedded Zero-tree Wavelet,EZW),有效地利用了小波系数的特性,是至今最有效的小波编码方法之一。EZW 的特点是可以产生嵌入式码流,可以按照要求的目标比率或目标失真的精度下随时结束编码,因而它有很好的发展前景和应用前景。但该方法对低频数据和高频数据均采用同样的编码,在较高压缩率下容易造成低频数据的损失,降低复原图像的质量;同时该方法也不同程度地存在算法时间复杂度和空间复杂度过高的缺点。

本文针对 EZW 编码方法存在的一些问题进行了改进,并将改进的 EZW 编码与提升格式的小波变换相结合,并应用到一个实际的机械臂远程视觉控制系统中,结果发现,利用基于小波变换的图像压缩得到的结果与原系统中基于 DCT 的图像压缩相比,前者无论在恢复图像的质量还是在解压所需运行时间上都优于后者。

1 小波变换在图像分解中的应用

所谓小波(wavelet),就是存在于一个较小区域的波。一个小波母函数经过伸缩和平移得到小波基函数。将伸缩因子和

平移因子经过采样并离散化得到离散化的小波函数。所谓小波变换或小波分解,实际上就是寻求空间 $L^2(R)$ 上的标准正交小波基,将信号在这组小波基上分解,以便进行分析和处理,并且还可以通过这些分解系数重建原来的信号。

小波提升格式是一种非常灵活的、对数据进行小波变换的方法。其整个变换在原位进行,即用新生成的数值替代原始数值,因此能够在不占用额外空间的情况下,完成所有的计算。本文实验中采用的是(5,3)小波提升格式。JPEG 2000 标准中给出了(5,3)小波提升格式的步骤。其中,正向整型变换分为如下两步^[1]:

$$Y(2n+1)=X_{\text{ext}}(2n+1)-\left[\frac{X_{\text{ext}}(2n)+X_{\text{ext}}(2n+2)}{2}\right] \quad (1)$$

$$Y(2n)=X_{\text{ext}}(2n)+\left[\frac{Y(2n-1)+Y(2n+1)+2}{4}\right] \quad (2)$$

相应的反变换为

$$X(2n)=Y_{\text{ext}}(2n)-\left[\frac{Y_{\text{ext}}(2n-1)+Y_{\text{ext}}(2n+1)+2}{4}\right] \quad (3)$$

$$X(2n+1)=Y_{\text{ext}}(2n+1)+\left[\frac{X(2n)+X(2n+2)}{2}\right] \quad (4)$$

其中, X_{ext} 和 Y_{ext} 表示周期对称延拓后的信号 X 和信号 Y 。

二维图像信号的小波变换,可以按照图 1 分别在水平和垂直方向进行滤波的方法实现二维小波多分辨率分解。原始信号 $f(x, y)$ 进行一级小波分解被分成 4 个子带,其中 LL 子带对应图像的低频成分;LH 子带对应水平低通-垂直高通成分,反映了图像在垂直方向的高频细节;HL 子带对应水平高通-垂直低通成分,反映了图像在水平方向的高频细节;HH 子带对应水平和垂直两个方向的高通成分,反映了图像在对角线方向的高频细节。为了获得图像的多分辨率分解,低频子带 LL 可以继续一分为四,每经过一级分解,当前子带 LL_{n-1} 被分成 LL_n, HL_n, LH_n 和 HH_n 4 个子带。对于 D 级分解,一幅图像共产生 $3D+1$ 个子带。JPEG 2000 标准支持的 D 范围是 $0 \leq D \leq 32$,典型值是 4~8。

经过小波多分辨率分解后,得到的低频子带图像依然保持原始图像的概貌,而各高频子带各自包含了原图像在水平、垂直和对角线方向的高频分量,因而大部分区域变化幅度不大、能量低;而幅度变化大、能量高的区域集中在图像内

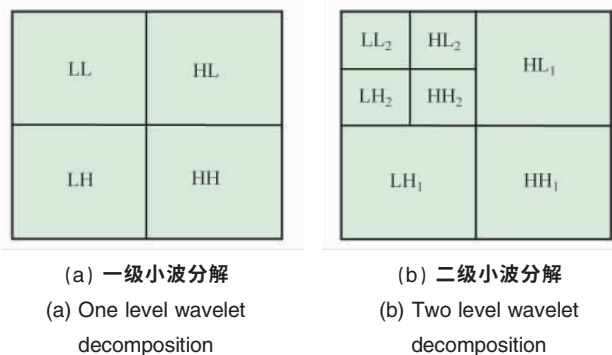


图 1 二维小波分解频带划分示意图

Fig. 1 Schematic diagram of 2D wavelet decomposition

物体的边缘和细节部分,它保持着物体的结构特征。小波分解在不同分辨率下各子带中系数的父子关系可以表示成树状结构,粗尺度上的小波系数称为父系数,为树根,在较细尺度上相应空间位置上的小波系数称为子孙系数。对于一个给定的门限 T ,某一个小波系数 x 如果满足 $|x| < T$,则称小波系数 x 是不重要的,否则称其是重要的。有文献^[3]统计小波系数中父系数与子系数的关系,父系数关于某个给定门限 T 是不重要的,则其子系数关于该门限也是不重要系数的概率高达 98% 以上。小波系数的这种特性称为零树特性。如果一个小波系数在一个粗尺度上关于给定的门限 T 是不重要的,那么在较细的尺度上同样空间中的所有小波系数关于 T 也是不重要的,此时,这些小波系数形成一个零树。零树中位于最低分辨率的零节点称为零树根。如果一个小波系数关于门限 T 是不重要的,但它的某个子孙系数关于该门限 T 是重要的,则称这个系数是孤立零。因此小波系数可以分为以下 4 种:正重要系数 (PS)、负重要系数 (NS)、零树根 (ZTR) 和孤立零 (IZ)。小波分解后,子图按重要性从低到高排序为: $LL_n, HL_n, LH_n, HH_n, HL_{n-1}, LH_{n-1}, HH_{n-1}, \dots, HH_1$ 。在对小波系数编码时,应依照子图重要性顺序扫描,这样的扫描顺序与图像信号的能量分布主要集中在低频,而高频较少,且人的视觉对低频比高频更敏感,对水平和垂直方向的边缘比对斜向边缘更敏感的特点一致。

2 EZW 编码及其改进

2.1 Shapiro 的 EZW 编码

嵌入式零树小波编码^[10] (EZW 编码) 采用逐次逼近量化 (Successive Approximation Quantization, SAQ) 的方式使其具备嵌入特性,逐次逼近量化是选择一组门限 $T_0, T_1, T_2, \dots, T_{N-1}$, 逐个进行门限对小波变换系数重要性检查。其中, T_0 应满足对所有小波变换系数 $Y(i, j)$, 有 $|Y(i, j)| < 2T_0$, 则 $T_0 = 2^{\lceil \lg(\max(|Y(i, j)|)) \rceil}$ 。门限序列的选取规则是 $T_i = T_{i-1}/2$ 。

编码过程中建立两个表:主表存放不重要系数或以其作为根节点的树,副表存放重要系数。利用上述层次树结构、符号和扫描顺序定义,对于给定门限 T 通过两步实现编码:① 主扫描按子图重要性顺序扫描所有系数,确立系数的类别并输出相应符号,若是 ZTR 则不必扫描其后代系数,否则继续扫描其子代,直到分裂出后代中的所有重要系数,扫描结束生成主表和副表;② 副扫描采用逐级逼近量化方式细化副表中的重要系数。通过使门限值按 2 的负幂级递减,重复主副扫描过程实现嵌入式编码。

嵌入式零树小波编码的特点是:不需要任何训练,不求预先存储码书,也不需要图像源的任何先验知识。但同时也存在一些缺点,主要表现在:① 经过小波变换后,原始图像的大部分能量集中在低频子带,其系数值比高频子带系数值大很多。低频子带的编码几乎不影响整个图像的压缩比,但其较小损失就可能对恢复图像的质量造成较大的影响。而 EZW 将低频数据和高频数据用同样的方法进行编码,在较低

码率的情况下,低频子带的信息损失较多,难以保证恢复图像的质量。② 在量化过程中,门限 T 的值按 2 的负幂级逐步减小,每减小一次 T ,就需要对整个高频子带重新做零树分类。对于每一次扫描,得到的重要系数的绝对误差上限为 $T/4$,对于一幅细节不是很丰富的图像来说,每一轮的扫描输出多是表示零树根和孤立零的码字,而表示重要系数的码字则相对较少,也就是说,在输出的码流中,大部分的复原数据为 0,这些 0 值对复原图像是无效的。

2.2 改进 EZW 编码

针对 EZW 编码存在的缺点,本文采用 3 个方面措施提高编码效率。

首先,由于图像经过小波分解后,低频数据所占比例很小,如 4 级小波分解后低频数据只占原图像数据量的 $1/256$,因此可以直接对这些数据进行存储。为了保证小波变换后的低频数据范围都在 $[0, 255]$ 之间,设定一个量化整型值 Q ,如果小波分解后的数据最大值 $f_{\max} > 255$, $Q = \lceil f_{\max}/255 \rceil$, $\lceil \cdot \rceil$ 表示向上取整。然后将所有待编码数据缩小 Q 倍,将调整后的低频数据直接存入压缩数组的最前端。在图像接收端,将解码后的数据乘以 Q ,然后再进行小波反变换来恢复图像。

其次,本文中取消主表和副表,而是通过设置一个标记矩阵 S 标记图像上的编码位置。 S 的大小与原图像一致,并将该标记矩阵所有元素初始化为 0。将主扫描和副扫描直接在图像矩阵内进行,从 HL_n 开始,按照原 EZW 编码中的扫描顺序扫描各高频子图。在扫描过程中,通过主扫描输出当前数据的类型码,即 PS、NS、ZTR 和 IZ 其中之一。对重要系数 PS 或 NS,继续进行副扫描,判断其所在区间并输出其所对应的区间码,将该区间码附加在主扫描输出的类型码之后。同时更新该系数,即用剩余值代替原系数值。在标记矩阵中,将扫描过的数据所对应位置的标记设置为 1,表示该数据已编码。对于 ZTR,要将其所有子孙系数所对应的位置标记也设置为 1,不再扫描这些系数。

最后,为了增加每次扫描输出的有效数据量,本文对副扫描方法进行改进。原算法中用 $T+T/2$ 分割区间 $[T, 2T)$,用“0”、“1”表示重要系数所在的区间,重建值为区间中值,每次扫描得到的重要系数绝对误差上限为 $T/4$ 。改进算法中,将该区间一分为四,即用 $T+T/4$ 、 $T+T/2$ 和 $T+3T/4$ 来分割区间 $[T, 2T)$,同时,分别用“00”、“01”、“10”、“11”表示重要系数所在的子区间。重建值仍采用子区间的中值。这样,用 2 个比特更为精确地表示重要系数,使一次扫描过程中的重要系数绝对误差上限下降到 $T/8$ 。而在细节并不很丰富的图像中,每轮扫描输出的有效系数所占比例较少,将副扫描的输出码流长度增加一倍对整体扫描次数的影响并不是很大,但能有效提高恢复数据的精度。

按照以上方案改进后的嵌入式零树小波编码算法步骤如下。

1) 判断低频数据的范围,如果最大值 $f_{\max} > 255$,则令 $Q = \lceil f_{\max}/255 \rceil$,否则 $Q=1$ 。将所有数据缩小 Q 倍,并存储低频数据。

2) 初始化。令 $n = \lceil \lg(\max\{|Y(i, j)|\}) \rceil$, 并令 $T = 2^n$; 将标记矩阵 S 初始化为零矩阵。

3) 主扫描和副扫描。对小波高频系数图中的点 (i, j) , 判断标记矩阵 S 对应位置的数值若为 1, 不编码; 若为 0, 则进行如下操作。

(1) 如果是重要系数, 那么

① 若为正数, 输出符号 PS, 否则输出符号 NS。

② 对该数据进行副扫描, 判断其所在区间, 若属于区间 $[T, T+T/4)$, 输出“00”; 若属于区间 $[T+T/4, T+T/2)$, 输出“01”; 若属于区间 $[T+T/2, T+3T/4)$, 输出“10”, 否则输出“11”。将区间中值作为重建值, 并将副扫描输出的码字附加在主扫描输出的符号之后。

③ 将 (i, j) 位置的系数值减去重建值得到剩余值。

(2) 如果其是非重要系数, 则

① 若是零树根, 输出 ZTR。

② 若是孤立零, 输出 IZ。

(3) 将标记矩阵 S 中 (i, j) 位置设置为 1, 若当前系数为零树根, 则将 (i, j) 的所有子孙位置的标记也设置为 1。

4) 更新量化。如果 $T=1$ 或达到要求码率, 算法终止; 否则, 令 $T=T/2$, 转至 3)。

3 实际系统的应用及其结果性能的对比分析

本文将基于小波变换的图像压缩方法应用到一个远程闭环视觉控制系统中, 对其中的图像传输部分进行了算法改进及实验结果对比研究。该系统装置的机械臂实物图及远程系统控制界面分别如图 2 和图 3 所示, 其中硬件部分有: 内部嵌有运动控制板的本地计算机、二自由度机械臂、摄像机、远程控制计算机和因特网^[2]。

在该网络控制系统中, 以二自由度机械臂为被控对象, 采用监督式的控制方式, 利用摄像机获取控制现场的图像并通过对分析图像得到机械臂末端执行器在既定坐标系中的位置, 然后将获取的图像数据和位置数据传送至远程客户端,



图 2 远程视觉控制系统本地装置实物

Fig. 2 Local devices of the remote vision control system

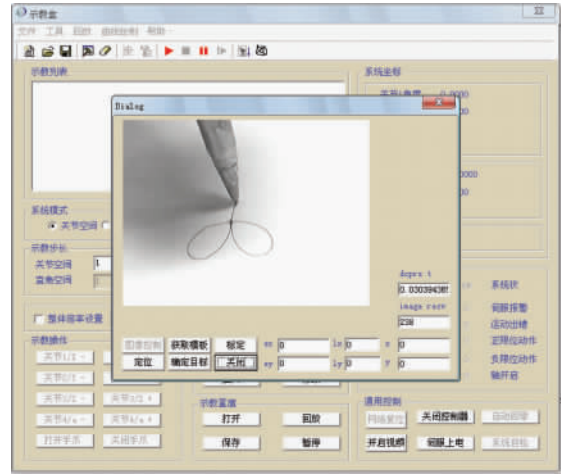


图 3 远程视觉控制系统客户端界面

Fig. 3 Client interface of the remote vision control system

在客户端实现控制现场图像的显示以及根据所获位置计算出的闭环控制指令的发送。本地控制计算机通过接收客户端发送的控制指令, 对机械臂进行相应的运动控制。在原系统中, 采用基于 DCT 的压缩算法实现机械臂末端执行器图像的传输。但由于该方法在较低比特率下存在明显的方块效应, 而附加的后处理算法虽然能将大部分块效应消除, 但也造成了图像平坦部分的过平滑以及额外计算量的增加。

为了衡量图像的质量, 采用均方误差 (mse) 和峰值信噪比 ($PSNR$, 单位为 dB) 计算图像的失真程度。两者的计算公式分别为

$$mse = \frac{1}{MN} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} [f(i, j) - f'(i, j)]^2 \quad (5)$$

$$PSNR = 10 \lg \frac{f_{p-p}^2}{mse} \quad (6)$$

其中, $f(i, j)$ 为原始图像 (i, j) 处的像素值; $f'(i, j)$ 为恢复图像 (i, j) 处的像素值; M 和 N 为图像大小; f_{p-p} 为原始图像信号的峰-峰值, 此处为 255。

实验中, 小波变换部分采用的是 Le Gall(5, 3)小波的提升格式, 并利用文中所提的改进 EZW 算法完成小波系数的编解码。由于实验图像大小为 240×320 , 小波多分辨率分解到第 4 级时, 低频图像大小为 15×20 , 行数为奇数, 不可继续分解, 故小波分解级数 $D=4$ 。实验在 Windows XP 操作系统下进行, 本地端和客户端的软件环境均为 Visual C++ 6.0; 本地端的硬件环境为: Intel(R) Pentium(R) Dual CPU E2200@2.20 GHz, 2.0 GB 内存, 远程客户端为: Intel (R) Pentium (R) Dual CPU T3200@2.0 GHz, 2.0 GB 内存。

本文将改进的小波压缩编码与原系统中基于 DCT 的图像压缩编码进行了对比实验。图 4 中, 4(a)为本地端的一帧源图像; 4(b)为原系统中采用基于 DCT 的图像压缩解压算法以及相应的后处理算法去除块效应后得到的远程客户端的解压图像; 4(c)为采用本文提出的提升格式与改进 EZW 编码相

