

基于小波编码的巡航导弹图像压缩方法研究

陈升来 郑爱民 李涛

(中国电子科技集团第二十八研究所 南京 210007)

摘要 弹载图像压缩系统要求压缩算法在保证图像质量的前提下对图像实现大压缩比实时压缩。针对这些要求,提出了采用小波编码算法作为图像压缩系统的实现算法和 DSP 作为算法的实现平台。小波压缩算法分为两个部分,即先对图像进行整型提升小波变换,再利用 SPIHT(Set Partitioning in Hierarchical Trees)算法对变换结果进行编码。对小波编码过程中存在重复运算和存储量大的缺点进行了改进,使之适合于 DSP 并行处理。实验结果表明,改进的算法与原算法相比,重构图像的峰值信噪比相当,大于 28dB,满足图像质量要求;图像压缩速度达到 20 帧/s,完全满足实时性要求。

关键词 巡航导弹图像,提升小波变换,SPIHT,DSP

Study on Compression Algorithm of Cruise Missile Image Based on Wavelet Code

CHEN Sheng-lai ZHENG Ai-min LI Tao

(The 28th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Nanjing 210007, China)

Abstract Wavelet code algorithm is adopted because compression algorithm is required to large-ratio and real-time compress images by missile-borne compression system under the condition of the guarantee of image quality, and DSP (Digital Signal Processor) is selected as the processor of algorithm. Wavelet code algorithm is composed of two step: images are transformed by integer lifting scheme, and the transform results are coded by SPIHT(Set Partitioning in Hierarchical Trees) algorithm. Wavelet code algorithm is improved to be fit for DSP parallel process for it has some defec-tions such as many repeat calculations, and consuming a large number of memories. Experiment results show that the peak signal-to-noise ratio (PSNR) of improved algorithm is larger than 28dB and is as much as original algorithm, which can meet the requirement of image quality; the compression speed is 20 frames per minute, which totally meets real-time compression requirement.

Keywords Cruise missile image, Lifting scheme, SPIHT, DSP

1 引言

巡航导弹通常通过卫星信道将图像数据传送给地面指挥人员。但卫星信道带宽有限,为了达到实时传输要求,必须对图像进行压缩,一般要求压缩率要大于 15:1。因此,寻求高速、大压缩比的图像压缩技术,是弹载图像压缩系统的迫切需要。

传统的压缩方法都存在不同程度的局限性,如差分脉冲编码调制(DPCM)压缩率不高,矢量量化(VQ)方法的计算复杂度随着维数的上升而急剧增加,JPEG(Joint Photographic Experts Group)在大压缩比情况下存在方块效应;而在传统傅里叶分析基础上发展起来的小波分析理论以其良好的空(时)频局部性和多分辨率分析能力,广泛应用于图像处理和压缩等领域^[1]。

本文在巡航导弹弹载图像压缩系统中引入小波编码压缩算法,即先对图像进行整型提升小波变换,再利用 SPIHT(Set Partitioning in Hierarchical Trees)算法^[2-4]对小波变换

结果进行编码。整个系统采用 DSP(Digital Signal Processors)作为算法的核心处理器,并针对 DSP 的并行特性,对小波变换小波编码算法进行改进,减少算法运算时间,使之满足图像压缩系统的实时性要求,也实现了弹载图像压缩系统的小型化。

2 弹载图像压缩系统硬件平台

弹载图像压缩系统的原理框图如图 1 所示。图像数据采集子系统包括 A/D 转换器、接口控制电路、双端口 RAM 等电路,它对 CCD 电视摄像头产生的模拟视频信号进行采样,产生数字信号并存入双端口 RAM 中。图像压缩子系统是弹载图像压缩系统的核心,采用 DSP 芯片实现图像压缩算法,这里的 DSP 芯片选用美国德州仪器公司(TI)TMS320C6205 DSP 芯片^[5]。TMS320C6205 是 TI 公司推出的高性能定点数字信号处理器(DSP),采用先进的超长指令字结构(VLIW),单指令周期可以并行执行 8 条指令;芯片的工作频率可达 200MHz,最大处理能力为每秒 16 亿条指令;片内集

到稿日期:2009-01-06 返修日期:2009-03-30 本文受国家自然科学基金(60774091)资助。

陈升来(1978-),男,博士,工程师,主要研究方向为遥感图像处理、模式识别,E-mail:chensl_01@163.com;郑爱民(1961-),男,研究员,主要研究方向为信息处理。

成大容量存储器,容量可达 1M 位;内部集成多种外围设备,以便控制片外的存储器、协处理器,例如 4 个独立信道的直接存储器存取控制器(DMA)、外部存储器接口等。信道编码与传输子系统对压缩后的图像信号进行信道编码,并采用扩频、跳频等多种抗强干扰通信技术将编码信息通过卫星中继传输给地面工作站。

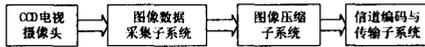


图 1 弹载图像压缩系统

3 整型提升小波变换及其 DSP 实现

3.1 整型提升小波变换

提升小波变换是一种不依靠傅里叶变换构造小波的方法。它将传统小波变换分解为提升形式来实现,并对每一步提升所产生的浮点数进行取整,构造出可逆的整型小波变换。提升小波变换分为分裂、预测、更新 3 个步骤^[6,7],如图 2 所示。

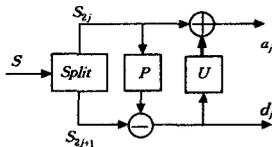


图 2 提升小波分析过程

分裂:一般是将原始信号 s 分解为偶信号 s_{2j} 和奇信号 s_{2j+1} 。

预测:保持偶信号 s_{2j} 不变,通过内插细分的方法预测奇信号 s_{2j+1} ,预测值与实际的差值为 d_j ,即 $d_j = s_{2j+1} - P(s_{2j})$,其中 P 为预测算子。

更新:更新过程就是通过 d_j 来更新数据 s_{2j} ,以保持原始信号 s 的某种特性,如保持平均值不变,该操作记为 $a_j = s_{2j} + U(d_j)$,其中 U 为更新算子。

3.2 二维提升小波变换的 DSP 实现

图像信号属于二维信号。在进行小波变换时,一般先对图像进行行滤波,再对行滤波结果进行列滤波。DSP 片内存有限,因此不能容纳一幅图像的数据或小波滤波的结果。滤波时,需要多次在片内内存与片外内存之间交换数据,增加硬件开销,影响滤波速度。针对这个问题,我们提出一个按块执行的提升方案,其体系结构由数据传输模块、行扩展模块、行滤波模块、列扩展模块和列滤波模块等组成,如图 3 所示。DMA 数据传输模块启动 DMA 在片外内存与片内内存之间传输数据块,传输的数据包括将要滤波的数据和滤波结果,数据块的大小由滤波器系数的长度决定;行扩展模块对将要进行行滤波的数据块进行行方向扩展;列扩展模块对将要进行列滤波的数据块进行列方向扩展;行滤波模块对扩展后行数据进行滤波处理;列滤波模块对扩展后列数据进行滤波处理。

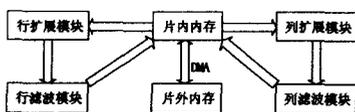


图 3 二维提升小波体系结构

5/3 双正交小波的提升步骤如式(1)所示。选用 5/3 双正交小波滤波器有两个好处:1)提升系数(1/2 和 1/4)的乘法运算很容易用移位操作来代替,便于定点 DSP 实现,与其它

滤波器相比,运算量最小;2)其滤波器长度是双正交小波中较短的,减少了运算次数,提高了小波变换速度。

$$\begin{cases} d_j = s_{2j+1} - \left[\frac{1}{2} (s_{2j} + s_{2j+2}) \right] \\ a_j = s_{2j} + \left[\frac{1}{4} (d_{j-1} + d_j) \right] \end{cases} \quad (1)$$

5/3 双正交小波进行列滤波时,只需 4 行数据,即数据块的大小至少为 4 行,其中 3 行为行滤波结果,一行为列滤波的高频信息,使得缓存区内的数据能够在行变换后马上进行列变换,不必等待所有图像数据的行变换结果,从而极大地减少了 DSP 对片外内存的读写次数,提高了提升变换的速度。

4 SPIHT 算法及其 DSP 实现

4.1 SPIHT 算法

SPIHT 是 A. Said 和 W. A. Pearlman 于 1996 年提出的一种零树编码算法^[2-4],它吸取了零树编码算法的许多思想,使用一种重要子集的分割方法和重要信息的传输方法,以至于不用算术编码也获得了与以前方法相同甚至更好的结果。

SPIHT 按小波变换频带从低到高的顺序将小波系数组织成一系列空间方向树,采用如下的树标号:

- $C(i, j)$: 坐标 (i, j) 处的小波系数;
- $D(i, j)$: $C(i, j)$ 所有后代(子孙)的集合;
- $O(i, j)$: $C(i, j)$ 直接后代(儿子)的集合;
- $L(i, j) = D(i, j) - O(i, j)$;
- $H(i, j)$: 所有根节点的集合。

SPIHT 算法使用了 3 个链表来组织空间方向树中的结构:不重要集合链表 LIS,不重要像素链表 LIP,重要像素链表 LSP。所谓“重要”就是指小波系数的幅值大于等于阈值,或者集合中任一小波系数的幅值大于等于当前阈值 T 。在编码过程中采用如下的集合划分准则:

- 1) 初始 $C(i, j)$ 和 $D(i, j)$, 其中 $(i, j) \in H$;
- 2) 如果 $D(i, j)$ 是重要的,则 $D(i, j)$ 被分为 $L(i, j)$ 和 4 个 $C(i, j)$;
- 3) 如果 $L(i, j)$ 是重要的,它被分为 4 个 $D(k, l)$, 其中 $(k, l) \in O(i, j)$ 。

SPIHT 算法将编码过程分为计算初始阈值、排序和细化 3 部分。计算初始阈值过程扫描所有的小波系数,求出小波系数的最大幅值,进而求出最大阈值,并将它作为初始阈值;排序过程首先对 LIP 中的小波系数进行重要性测试,并将测试结果为重要的小波系数移入 LSP 中,然后对 LIS 中的集合进行重要性判断。当某一集合重要时,便按照集合划分准则进行分裂,分别将分裂产生的集合置入 LIS 中,重要的小波系数置入 LSP 中,不重要的小波系数置入 LIP 中,同时输出所有满足 $T \leq |C(i, j)| < 2T$ 的小波系数、集合的重要性以及重要像素的符号;细化过程输出 LSP 中系数的第 n 个最重要位($n = \log_2 T$)。

4.2 SPIHT 算法的 DSP 实现

4.2.1 SPIHT 算法的缺陷

从 SPIHT 算法的编码过程来看, SPIHT 算法存在不适合 DSP 处理的缺陷:

1) 编码过程中需要占用大量内存。随着阈值的降低、集合的不断分裂,用来存储重要像素坐标、不重要集合坐标和不重要像素坐标的 3 个链表也越来越大。在最坏的情况下,所

有的小波系数都变成重要的像素,将消耗大量内存。对于一幅 512×512 大小的图像,如果存储一个坐标的大小为 4 字节,那么需要 1M 字节的内存存储链表。

2) 由于 DSP 片内内存的容量不能满足 3 个链表需要的内存,因此将会增加 DSP 交换片内内存与片外内存数据的次数,这不仅消耗大量编码时间,而且增加编码的复杂性。

3) 在扫描过程中存在大量的重复操作。每次变换阈值时,需要不断地判断 LIS 中的集合或者 LIP 中的小波系数是否是重要的。

4) 扫描过程的无序性,不适合 DSP 并行处理。扫描过程中,将要扫描的集合或系数的坐标完全由链表决定,没有规律可循,造成寻址困难,不利于 DSP 并行流水线处理。

本文针对这些缺陷从以下几方面对其改进,使其适合 DSP 处理,以减少内存消耗量和运算次数,满足弹载图像压缩系统的要求。

4.2.2 最大幅值的求取

SPIHT 算法需要求取最大幅值计算初始阈值,原算法通过扫描图像的所有小波系数来得到最大幅值,但是按照 SPIHT 集合划分准则 2),只有当 $D(i, j)$ 重要时,才会进一步扫描 $L(i, j)$,即方向树上的位于主干的小波系数要比位于末端的小波系数重要,且初始时,集合 LIP 和 LIS 里只有属于 H 集合的像素 $C(i, j)$ 和坐标 $D(i, j)$,因此不必扫描所有的小波系数,只需扫描 LL_n 和 LL_{n-1} (LL 为小波低频子带, n 为小波变换级数)子带的小波系数,就能求出最大幅值。对于 4 级的小波变换,该算法消耗的时间是原算法的 1/8,因此大大节省了最大幅值的计算时间。

4.2.3 最大值图

每次阈值变换时,需要不断地判断 LIS 中的集合是否为重要集合,即集合内的所有小波系数的最大幅值要与当前阈值做比较。因此引入了最大值图来解决该问题,它为原图像 1/4 大小的矩阵,每个位置 (i, j) 记录了 $D(i, j)$ 中小波系数的最大幅值,从而减少了计算量。

4.2.4 单棵零树编码方法

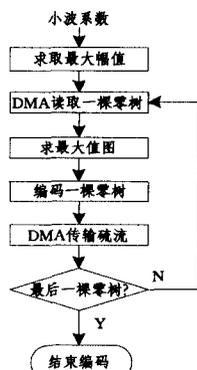


图 4 单棵零树编码方法

SPIHT 编码过程中消耗大量内存并且编码坐标无序,不利于 DSP 的并行流水线处理,但 SPIHT 将小波系数组织成一系列空间方向树,因此在编码过程中可以采用单棵零树的编码方式,其运算过程如图 4 所示。这样做有如下好处:1)扫描过程中,只需保存一棵零树的 2 个链表:LIP 和 LIS。例如,一棵 4 级小波变换的零树包含 341 个小波系数,在最差的情况下,即所有的系数都是重要系数,需要 1364 个字节存储坐标,

需要 171 个字节存储最大值图,即总共只需 1535 个字节。与原算法 1M 字节内存相比,单棵零树编码方法大大减轻了内存压力。2)扫描过程是相对有序的,扫描过程是针对一颗零树进行的。3)DSP 片内内存完全能够满足编码一颗零树所需的内存,因此减少片内内存数据与片外内存数据的交换次数,从而提高运算速度,也适合多处理器内核的 DSP 并行流水线处理。

5 实验结果

采用 4 幅遥感图像作为实验对象,图像大小为 512×512 ,4 级 5/3 双正交小波变换的实现时间为 12ms。实验中采用原始 SPIHT 算法和改进的算法对遥感图像进行压缩,压缩率比 16:1。鉴于 SPIHT 原算法在 DSP 上实现困难,故将 SPIHT 原算法改在 PC 机上实现。实验从重构图像的峰值信噪比(PSNR)对两种算法进行比较,并测量了改进算法在 DSP 上的编码时间。实验结果如表 1 所列,图 5 显示了两种方案重构图像的人眼视觉效果。

表 1 峰值信噪比(PSNR)比较和编码时间

图像	PSNR(dB)		改进算法 编码时间(ms)
	原 SPIHT 算法	改进算法	
Image1	28.7	28.4	35.6
Image2	28.8	28.3	35.0
Image3	30.1	29.6	35.1
Image4	28.8	28.4	35.5



图 5 Image1 用不同算法压缩重构视觉效果对比

从表 1 可以看出,改进的 SPIHT 算法与原始算法 PSNR 相当。从图 5 的显示结果也可以看出,两种算法的重构图像人眼视觉效果很好,能够满足弹载图像的质量要求。从压缩时间看,小波变换加 SPIHT 编码的时间大约为 47ms,处理速度达到 20 帧/s,满足弹载压缩系统的实时性要求。

结束语 为了实现弹载图像高速、大压缩比压缩,提出了采用小波编码算法作为弹载图像压缩系统的实现算法,并采用高速 DSP 芯片作为压缩系统的硬件平台,为实时实现图像压缩奠定了基础。小波压缩算法利用提升小波变换来消除图像内部的相关性,并在此基础上利用 SPIHT 算法进一步消除小波系数之间的相关性,实现对小波系数的量化和编码。

针对小波编码算法编码过程中存在重复运算、内存消耗大等问题,对原算法进行了改进,引入基于块的整型提升了小波变换,使得列变换只需少量行变换结果就能进行列变换,提升小波变换速度;采用“最大幅值求取方法”、“最大值图”和“单棵零树编码”等多种方法,降低了 SPIHT 算法的复杂度,减少了内存需求,提高了 DSP 的利用率。当压缩比为 16:1 时,压缩速度达到 20 帧/s,完全满足弹载图像的压缩要求,其图像 PSNR 大于 28dB,满足了图像质量要求。小波编码改进算法也可应用于其他高速实时压缩领域。

参考文献

[1] Antonini M, Barlaud M, Mathieu P, et al. Image coding using

wavelet transform[J]. IEEE Trans. Image Processing, 1992, 1(2):205-220

- [2] Shapiro J M. Embedded image coding using zerotree of wavelets coefficients[J]. IEEE Trans. Signal Processing, 1993, 41(12): 3445-3462
- [3] Said A, Pearlman W. A new, fast, and efficient image code based on set partitioning in hierarchical trees[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 1996, 6(6):243-250

- [4] 王向阳,杨红颖.一种新的低内存零树小波图像编码算法[J]. 计算机科学, 2002, 29(8):104-105
- [5] Document SPRU189F. TMS320C6000 CPU and instructions set reference guide[OL]. 2000, www. ti. com
- [6] Calderbank R C, Daubechies I, Sweldens W, et al. Wavelet transforms that map integers to integers[J]. Applied and Computational Harmonic Analysis, 1998, 5(3):332-369
- [7] Daubechies I, Sweldens W. Factoring wavelet transforms into lifting steps[J]. J. Fourier Anal. Appl., 1998, 4(3):247-269

(上接第 258 页)

ODCS 初定位环节主要由采集卡函数实现,花费时间很少(10ms~20ms),ODCS-SIFT 处理时间主要用于后续 SIFT 特征的提取与匹配。由表 1 和表 2 可以看出,实际场景图像为 320 像素×240 像素,初定位区域图像为 114 像素×84 像素,所提取的 SIFT 特征数目由 530 减少为 159,相应的耗时由 0.735s 缩短为 0.250s,节省了约 66% 的时间。在 SIFT 特征匹配时,匹配时间由 0.282s 缩短为 0.094s,节省了约 67% 的时间。并且,由于待匹配特征点的精简和集中,匹配点数目和正确率都有所增加。

表 1 实验 1 中特征点提取结果对比

对比项	目标 A	SIFT	ODCS-SIFT
图像大小/pix	242×216	320×240	114×84
特征点数量	550	530	159
提取时间/s	0.656	0.735	0.250

表 2 实验 1 中特征点匹配结果对比

对比项	SIFT 匹配	ODCS-SIF 匹配
匹配时间/s	0.282	0.094
匹配点数量	86(2 error)	94(0 error)
匹配正确率	97.67%	100.00%

实验 2 目标 B 在图像中占不同比例时 ODCS-SIFT 的识别效率实验。用摄像机由远及近拍摄目标 B,选取其中 7 帧图像(如图 3 所示),图像大小均为 320 像素×240 像素,ODCS-SIFT 与原 SIFT 的时间对比结果如图 4 所示。可见,目标在场景图像中所占比例越小,ODCS-SIFT 算法的时间优势越明显,该算法的识别时间随目标在图像中所占比例的增大而增加,当目标占据整个图像时,计算时间与传统的 SIFT 方法相当。

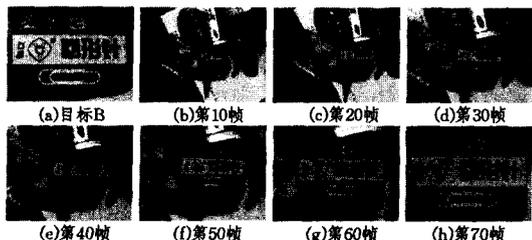


图 3 对目标 B 的实验

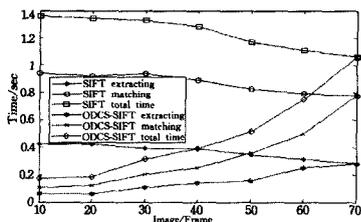


图 4 实验 2 中 ODCS-SIFT 和 SIFT 的时间对比

结束语 本文提出了一种基于主色集分割结合 SIFT 的彩色目标识别方法 ODCS-SIFT,旨在提高 SIFT 目标识别的实时性。目标主色集和 SIFT 特征被有效地结合,应用主色集进行目标初定位,再结合 SIFT 进行特征点提取和匹配。由于避免了对非目标区域进行处理,从而提高了识别的实时性,为自主机器人在复杂环境中的实时目标识别奠定了基础。

全局特征和局部特征在目标识别中各有优势。本文只采用颜色作为全局特征,而实际中对某些目标利用形状或纹理结合 SIFT 可提供更好的描述。设计更加通用的综合特征目标描述与识别方法,是本文下一步的工作。

参考文献

- [1] Mikolajczyk K, Schmid C. A performance evaluation of local descriptors[A]//Proceedings of IEEE International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition[C]. Madison, IEEE, 2003:1403-1410
- [2] Lowe D. Object recognition from local scale - invariant features [A]//Proceedings of International Conference on Computer Vision[C]. Vancouver, ICCV, 1999:1150-1157
- [3] Lowe D. Distinctive image features from scale - invariant key - points[J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 60(2):91-110
- [4] Ke Y, Sukthankar R. PCA-SIFT: A More Distinctive Representation for Local Image Descriptors [A] // Proceedings of the IEEE Computer Society Conference[C]. Washington DC, IEEE, 2004:511-517
- [5] Abdel-Hakim E, Farag A. CSIFT: A SIFT Descriptor with Color Invariant Characteristics [A] // Proceedings of IEEE International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition [C]. New York, IEEE, 2006:1978-1983
- [6] Bosch A, Zisserman A, Munoz X. Scene classification via pLSA [A] // Proceedings of the European Conference on Computer Vision [C]. Graz, ECCV, 2006:517-530
- [7] 徐旭,朱森良,梁倩卉,等.一种用于 CBIR 系统的主色提取及表示方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 1999, 11(5):385-388
- [8] 袁昕,吴春明,朱森良,等.基于主色选择的 CBIR 检索[J]. 计算机研究与发展, 2002, 39(9):1120-1126
- [9] 黄晶,赵臣,周明明.基于快速彩色空间变换的足球机器人目标搜索[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2003, 35(9):1036-1039
- [10] 何超,熊蓉,戴连奎.足球机器人视觉图象的快速识别[J]. 中国图象图形学报, 2003, 8(3):271-275