

# 虚拟地形环境中高分辨率影像快速解压算法

卞燕山<sup>1</sup>, 邹鹏<sup>2</sup>, 路伟涛<sup>1</sup>

(1.装备学院研究生院,北京,101416;2.装备学院重点实验室,北京,101416)

**摘要** 虚拟地形环境具有广泛的应用,是高分辨率影像构成环境的可视化基础。影像精度提高所产生的庞大数据量使得读取和存储受限制,影响可视化系统的表现能力,因此数据压缩成为提高系统性能的有效手段。飞行器在低能见度条件下的山区高速低空飞行时,飞行员往往不知所处地形环境,存在潜在危险;与飞行员当前视点一致的虚拟地形环境能为其提供逼真的可视化场景,保持特殊条件下地形环境可见性。将影像数据经过提升小波变换到小波域,有效利用小波系数能量集中在低频子带以及子带间系数的相关性特点,将小波系数进行跨频带合理组织并矢量化,应用纹理压缩算法之一的矢量量化编码压缩小波系数,其压缩比大、非对称编码、解码速度快等特点适合飞行中对实时性的要求。

**关键词** 图像压缩;提升方案;非对称编码;矢量量化;飞行

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2012.06.011

**中图分类号** TP391.9 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2012)06-0050-05

为完成低能见度、低空复杂环境下的飞行任务,需要飞行器为飞行员提供有效的辅助导航手段。一般情况下,飞行器安装了微光夜视仪、GPS 等导航设备,但由于缺乏更加完善的辅助导航设备,飞行员在飞行过程仍旧采用目视机外场景,利用仪表参数完成飞行任务。在低云层、浓雾、夜晚等不良环境条件下,在地形变化较大的山区低空高速飞行时,几乎不能进行有效的障碍告警和地形碰撞规避,无法遂行相关任务。与飞行员当前视点一致的三维视景仿真是在低能见度条件下实现飞行辅助导航最有效的途径,能提供人眼所不能看清楚三维地形环境。侦察卫星和测绘卫星获得的高分辨率遥感影像,是生成真实感虚拟三维地理环境的基础条件。若飞行器的航程达到 700 km,采用 1 m 分辨率的卫星影像,其数据量将达到 TB 级,对于内外存容量有限、CPU 效率不高的导航终端而言,如此巨大的数据量势必影响到绘制的效率,从而影响虚拟三维场景生成的实时性。数据压缩是解决数据量大的有效手段,是数据组织管理的核心基础。针对飞行器这类特殊应用平台,其压缩过程可以事先完成,但解压缩过程在飞行中必须实时显示,因此快速有效的解压缩算法是实现实时性的关键。根据这些特点,论文设计出一种基于飞行任务的有效影像数据压缩和解压缩方法。

## 1 提升方案小波变换

近 20 年来,基于离散小波变换的图像压缩编码技术取得了迅速的发展和商业上的成功,主要是因为小波变换多分辨率特性与人眼的视觉特性相符,且非常适于图像渐进传输<sup>[1]</sup>。二维离散小波变换最有效的实现方法之一是 Mallat 的塔式分解方法,这种传统的基于卷积的离散变换计算量大,耗时多,并对存储空间的要求高。提升算法(Lifting scheme)相对于 Mallat 算法而言,是一种更为快速有效的小波变换实现方法。提升算法在 Mallat 算法的基础上进行了改进,其基本思想从小波多分辨率分析开始,逐步修正直到实现满足一定特性的多分辨率分析,该算法由分解、预测和更新 3 个基本运算构成<sup>[2]</sup>,见图 1(a)。

收稿日期:2012-03-26

基金项目:湖南省研究生科研创新基金资助项目(CX2010B025)

作者简介:卞燕山(1986—),男,湖北公安人,博士生,主要从事信息系统设计理论与方法研究。

E-mail:bys02201@163.com

1)分裂。分裂的目的是将信号  $x[n]$  分裂成相互关联的 2 个部分,即  $x_e[n]$  和  $x_o[n]$ ,且  $x_e[n]$  和  $x_o[n]$  的相关性越强,分裂的效果越好。分裂采用 lazy 方法,即:

$$x_e[n] = x[2n]; x_o[n] = x[2n+1]$$

2)预测。所谓预测,就是用  $x_e[n]$  来预测  $x_o[n]$ ,预测误差为:  $d[n] = x_o[n] - \text{INT}[P(x_e[n])]$ 。其中,  $P(\cdot)$  表示预测算子,  $\text{INT}[\cdot]$  表示取整。

3)更新。更新的目的是要用  $d[n]$  来修正  $x_e[n]$ ,使得修正后的  $x_e[n]$  (记为  $c[n]$ ) 只包含信号  $x[n]$  的整体信息,即:  $c[n] = x_e[n] + \text{INT}[U(d[n])]$ ,  $U(\cdot)$  表示更新算子。

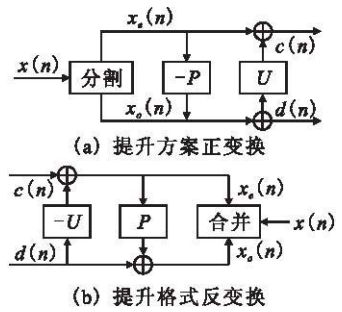


图 1 提升方案正变换与反变换图示

Fig.1 Transformation and inverse transformation of lifting scheme

反提升过程为上述过程的逆变换,见图 1(b)。提升算法是一种改善快速小波变换的方法,但是只有一些特殊的小波变换很容易用它构造,比如 Daubechies 族的双正交小波<sup>[3-5]</sup>。从计算复杂度上看, D5/3 和

D2/6 小波的计算量最小, D9/7 小波的最大;但 D5/3 和 D2/6 小波的压缩性能不如 D9/7 小波, D2/6 小波的压缩性能不如 D5/3 小波。由于论文重心在于解压速度,因此采用 D5/3 小波进行小波域变换以提高速度,这也是 JPEG2000 推荐使用的 2 种变换方法之一。

1 级小波分解以后得到  $LL_1, HL_1, LH_1$  和  $HH_1$  4 个子带,然后对  $LL_1$  子带进行继续分解。在这些子带中:  $LL_N$  表示近似分量,即低频轮廓分量,集中了大部分能量;  $HL_N, LH_N, HH_N$  表示细节分量,即高频细节分量,具有的能量非常少。采用 D5/3 小波对影像进行 3 级小波分解,见图 2。

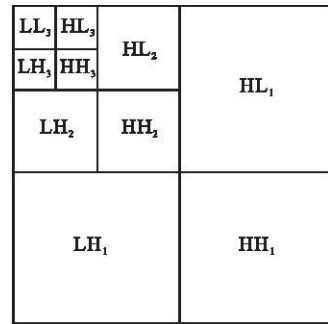


图 2 3 级小波分解示意图

Fig.2 3-levels wavelet decomposition

## 2 矢量量化编码

量化编码中经典的 EZW<sup>[6]</sup>、SPIT<sup>[7~8]</sup>、SPECK<sup>[9]</sup> 以及 EBCOT<sup>[10]</sup> 等有损编码算法都具有对称性,都需要在压缩和解压过程中不断重复搜索、更新小波域系数,是一个低效率过程,耗费时间。EZW 编码过程中形成多颗零树,需要对图像多次扫描,提高了编码复杂度; SPIHT 集合分类策略比较复杂,需要 3 个列表存储待编码量化的小波系数,计算较复杂,编码速度有相应的降低,并增大内存开销; SPECK 采用块间独立编码,采用 2 个列表来组织小波系数,不断迭代进行倍频带分裂,速度也比 SPIHT 稍快; EBCOT 是 JPEG2000 标准的核心算法,编码器对每一个编码块进行编码,产生的码流具有分辨率可伸缩性、精密的内嵌处理、可并行性和高容错性等非常好的特点,但其编码时间冗长。

矢量量化编码(Vector Quantization, VQ)是一种高效率纹理压缩算法,具有高速、实时解压缩特性。解码过程中只需要在码书中根据矢量量化编码索引号,读取出码字,即一系列小波系数,所需时间消耗相当少,极大地提高解码速率。矢量量化特点是压缩编码时间长但解码快,这种非对称性的编码算法恰好适合飞行中对解码速度的高度要求。

矢量量化过程<sup>[11]</sup>可以定义为从  $K$  维欧几里德空间  $R^k$  到其一个有限子集  $Y$  的一个映射,其中  $Y = \{Y_j; j = 1, 2, \dots, N\}$ ,  $Y_j = (y_{j1}, y_{j2}, \dots, y_{jk})$ ,  $j = 1, 2, \dots, N$ 。  $Y$  被称为码书,  $N$  为码书大小,  $Y_j$  为码字。矢量量化的优点是可以获得较高的压缩比,而且编解码比较简单。编码过程就是在码书中搜索与输入矢量最匹配的码字,在编码算法中一般采用计算输入矢量  $X$  和码字  $Y$  之间欧式距离的平方,当输入矢量和码字间的欧式距离最小时,即认为它们为最佳匹配。这样,就可以直接以码字的编号  $j$  代替输入矢量,从而实现压缩。码书设计是矢量量化压缩系统的关键环节,码书设计得越优化,矢量量化器的性能就越好。码字搜索是矢量量化中的一个最基本问题,矢量量化过程本身实际上就是一个搜索过程,即搜索出与输入匹配最好的码字。矢量量化中最常用的搜索方法是全搜索算法和树搜索算法。全搜索算法与码书生成算法是基本相同的,在给定速率下其复杂度随矢量维数  $K$  以指数形式增长,全搜索矢量量化器性能好但计算复杂。树搜索过程是逐步

求近视的过程,中间的码字是起指引路线的作用,其复杂度比全搜索算法显著减少,搜索速度较快。

飞行辅助导航中对压缩过程要求低,对编码精度要求相对较高,因此采用性能好的全搜索算法,其量化信噪比高于树搜索算法。因为码书的设计只能更适合于某一类图像,而不能为千变万化的图像设计统一的码书,所以应在小波变换域内作矢量量化。

### 3 小波域的跨频带矢量量化

图像经过 D5/3 提升小波变换后得到的小波系数有特殊性质。不同尺度的高频子带图像之间存在同构特性,而且 3 个方向上不同尺度下的小波系数能量大小不同,各方向的侧重不同,在同一方向上,有更强的同构性和相似性,事实上各方向不同尺度下对应频带的相关性最强。

为提高矢量量化的编码效率,在构造矢量时,必须充分利用这些相关性。此外,图像的能量主要集中在低频子带,高频子带所占能量较少,且不同分辨率不同高频子带中的分布非常相似,接近 Gamma 分布或者 Laplace 分布;各高频子带系数大部分分布在零值附近,概率密度分布曲线的中心点和最大值为零。高性能的矢量量化器必须依照图像小波系数的特性来构造矢量,使用不同子带的系数构成矢量来压缩小波系数,就可以利用不同尺度同方向小波系数的相关性。如果对不同频段分块进行矢量编码,则容易出现块状效应,只有当码书较大时才不太明显,但会导致压缩率下降。根据以上分析,本文采用跨频带矢量构成的方法。将不同分辨率下的子图像对应同一位置的数据按树结构结合在一起,以 256×256 图像经 3 级小波变换为例,构造生成 1 024 个 64 维矢量,矢量构造过程见图 3,按折线方向排序构造矢量。这样整个图像就可以用一个统一的码书,有效利用了小波变换后的系数特点,可以改善矢量量化的质量。

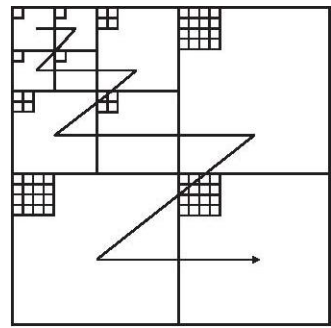


图 3 矢量构造示意图

Fig.3 Vector construction

同时,考虑到 3 级小波变换后能量集中程度不如更多级(比如 6 级)小波分解的特点,并且低频系数要比高频系数重要,本文对各子带系数进行加权处理。针对 3 级小波分解,将 LL<sub>3</sub> 子带系数乘以 4, LH<sub>3</sub>, HL<sub>3</sub>, HH<sub>3</sub> 乘以 2,其余子带小波系数不变;编码及解码过程中只需对各子带进行相应的位移运算即可。具体说来,在压缩过程中,对于 64 维矢量码字,前 1 至 4 位码字分量左移 4 位,5 至 16 位左移 2 位即可。此时,由于突出低频子带系数,而构造 64 维矢量码字不利于体现小波系数的分级性,因此本文对 64 维矢量进行分割,

按顺序截断成 4 个 16 维矢量。该方法的优点在于:①加快码书的设计,降低码书的复杂度;②低频子带的重要小波系数与高频子带的非重要子带系数可以分开设计为不同的码字。由于高频子带系数大部分为零值,可以设计较少的码字来表示该类小波矢量,降低编码比特率;而低频子带可以设计相对较多的码字,提高重要系数矢量在码书中的比重。

综合上述分析,基于提升小波变换的矢量量化编码与解码流程见图 4。从图中可以看到,解压缩过程非常简单,与压缩过程为非对称关系,保证解压过程的高效实时性。因此,可以根据所需要的影像效果和压缩率设计出合适的码书,通过牺牲矢量量化时间获取更精确码书;合理的码书有助于影像解压缩过程,加快解码和提高重构影像效果。

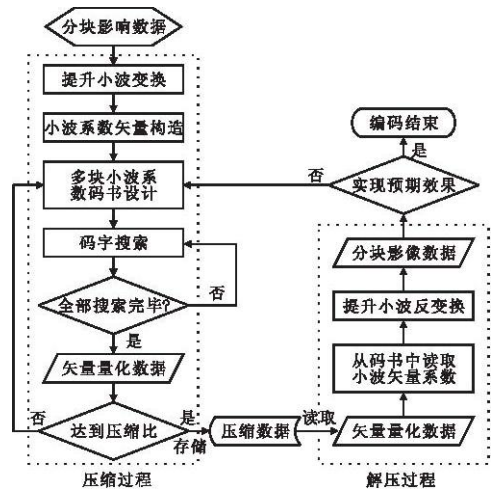


图 4 矢量量化编码流程图

Fig.4 Vector quantization coding

## 4 实验结果分析

飞行器在非正常条件(比如夜晚)飞行过程中,依据导航设备获取三维位置,然后在三维视景仿真中实时显示目前所处位置地理信息,对飞行姿态和路线及时调整,避免出现意外。根据前面所述内容,对本文算法进行试验对比分析。实验环境为:Windows XP SP3, Inter Core(TM) Duo 2.93 GHz, 内存 2 GB, 显卡为 ATI Radeon HD 5450, 采用 C++ 语言编程实现。

选取某山地区域 bmp 格式数字影像进行分割,使其成为  $256 \times 256 \times 8$  bits 的灰度影像块,以 100 幅影像块为训练样本设计 16 维码书,大小分别为 64、256、1 024 和 4 096,多幅影像采用同一个码书。由于 JPEG2000 作为新一代静止图像压缩标准,具有优秀的压缩效果,所以将其与文中方法进行试验对比。解压缩相应结果见表 1,影像重构对比见图 5。

表 1 不同比特率下本文算法与 JPEG2000 重构影像对比

Tab.1 Reconstruction images comparison between proposed method and JPEG2000 with different bpp

比特率/bpp	VQ 码 书大小	PSNR/dB		解压缩时间/ms	
		本文算法	JPEG2000	VQ	JPEG2000
0.375	64	20.27	23.67	41	76
0.5	256	24.14	25.29	48	83
0.625	1 024	26.15	26.97	54	91
0.75	4 096	27.91	28.19	61	109

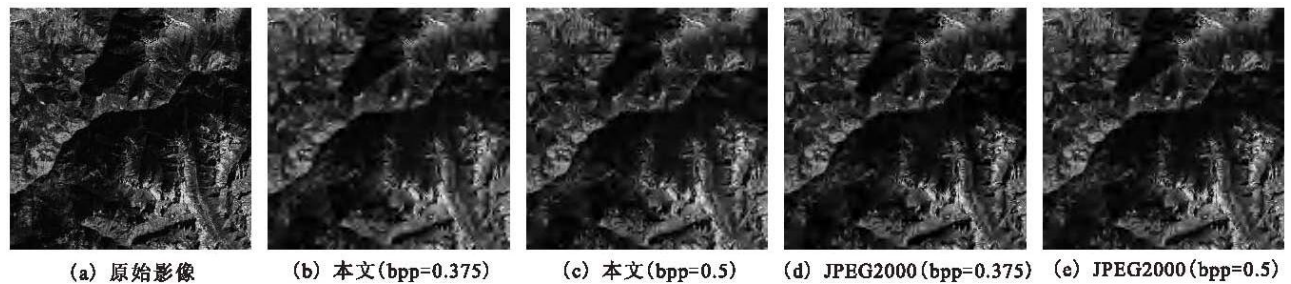


图 5 影像重构图对比

Fig.5 Reconstruction images comparison

从表 1 结果显示,当比特率为 0.5 时,重构影像已经相当接近原始影像,人眼基本不能区分其差别,这主要得益于码书的良好设计;当比特率为 0.375 时,细节部分存在模糊效果,这与基于小波变换的影像压缩特性相符合,64 码书的恢复效果较差,但码书为 64 时仍能够从影像中获取绝大部分信息;图 5 分别显示了不同码率下本文算法与 JPEG2000 的影像恢复效果。本文算法码书设计耗时长,100 幅影像训练时间约为 160 min。但是本文算法解压速度要快于 JPEG2000,随着码书变大,解码时间慢慢增加,不是指数级的,这主要得益于解码过程中简单的码字查找。该实验表明,采用文中算法,将重要系数进行放大,有助于保存重要低频信息,同时相对而言高频信息得到缩小。该方法与 JPEG2000 中的量化算法 EBCOT,以及其它算法比如 SPIHT、EZW 等相比,由于没有扫描低频子带中的重要小波系数,在矢量量化过程中可能将这些子带的重要小波系数归为非重要系数而采用零值附近的码字进行量化,从而可能丢失该部分细节。这就是本文算法的峰值信噪比低于 JPEG2000 的原因;但是随着码书的增大,差距不断缩小,从表 1 中可以看出。

## 5 结语

本文针对飞行器在低能见度等复杂气象条件下的视距困难,采用三维地形环境可视化技术为飞行员提供地理环境可视化导航;针对实际应用中实时性的要求,采用提升小波变换将影像变换到小波域。利用小波不同频段系数关联特点,提出跨频带矢量化小波系数。将低频子带系数进行放大,然后重新组织跨频带矢量,突出重要小波系数,有效提高编码效果。通过实验证明,重构影像能保持良好效果,解压缩时间满足实时性要求。在实际应用中,压缩率还可以进一步提高,解码速度可以相应减少。此外,文中针对灰度影像的处

理可以推广到彩色影像,只需将其颜色分量进行分离或者变换到其它颜色空间,然后单独处理即可;而高程数据可当作影像进行处理,简单工作就是将其映射到相应的颜色分量。

### 参考文献(References):

- [1] Macarena Boix, Begona Canto. Wavelet transform application to the compression of images[J]. Mathematical and computer modelling, 2010, 52(7):1265-1270.
- [2] Zhang Jiamei, Li Xiangxin, Ma Ning. A study of GIS terrain data compression method based on lifting format[J]. Science technology and engineering, 2011, 11(3):616-619.
- [3] CAI Qiuyuan, WANG Gengsheng, YU Yunxin. Research of still image compression based on Daubechies 9/7 wavelet transform[C]//2010 2nd international conference on future computer and communication. Wuhan: IEEE press, 2010: 357-361.
- [4] Ma Junxing, Wang Jin. Research on the selection of the order of Daubechies wavelet-based elements[C]//2010 international conference on e-product e-service and e-entertainment. Henan: IEEE press, 2010: 1-3.
- [5] LING Chaodong, LIU Rong, QIAN Jiang, CAI Can-hui. ECG signals compression based on 5/3 lifting wavelet and its VLSI implementation[J]. Signal processing, 2010, 26(6):930-935.
- [6] Ma Xianmin. Improved EZW compression coding algorithm for coal gangue image[C]//2009 2nd international congress on image and signal processing. Tianjin: IEEE press, 2009: 1-4.
- [7] Fang Zhijun, Xiong Naixue. Interpolation-based direction-adaptive lifting DWT and modified SPIHT for image compression in multimedia communications[J]. IEEE systems journal, 2011, 5(4):584-593.
- [8] JIA Zhike, CUI Huijuan, TANG Kun. Improved SPIHT still image compression algorithm[J]. Journal of tsinghua university: science and technology, 2001, 41(7):25-28.
- [9] Perlman W A, Islam A. Efficient, low-complexity image coding with a set-partitioning embedded block coder[J]. IEEE transactions on circuits and systems for video technology, 2004, 14(11):1219-1235.
- [10] Chen Kuanfu, Lian Chung jr, Chen Honghui, et al. Analysis and architecture design of EBCOT for JPEG-2000[C]//The 2001 IEEE international symposium on circuits and systems. Sydney: IEEE circuits and systems society, 2001: 765-768.
- [11] Matsumoto Hiroki, Sasazaki Kazuya, Suzuki Yukinori. Color image compression with vector quantization[C]//2008 IEEE conference on soft computing in industrial applications. Muroran: IEEE press, 2008: 84-88.

(编辑:徐楠楠)

## Fast Decompression Algorithm for High-resolution Texture Image in Virtual Terrain Environment

BIAN Yan-shan<sup>1</sup>, ZOU Peng<sup>2</sup>, LU Wei-tao<sup>1</sup>

(1. Postgraduate School, Academy of Equipment, Beijing 101416, China; 2. Key Lab, Academy of Equipment, Beijing 101416, China)

**Abstract:** Virtual terrain environments have been used widely, and high-resolution texture images are of the foundation for visualization. Huge amount of data caused by the improvements on image resolution leads to the restriction of reading and storage which can influence the visualization system, data compression is an efficient means for boosting the system performance. When an aircraft is flying through a mountainous terrain at a high speed and low altitude under the condition of poor visibility, the manipulator usually gets disoriented where danger is likely to happen. The virtual terrain environment can provide the manipulator with a broad vision of the visual three-dimension geographical environment which keeps the visualization of terrain under special conditions. Based on the wavelet coefficients after lifting scheme, we firstly take the advantages of energy concentration on low-frequency sub-bands and relativity between sub-bands, then organize those coefficients across sub-bands and vectorize them, and again use one of the texture compression algorithm-vector quantization coding-for coefficients compression. This scheme is propitious for the real-time requirement in flight because of the high compression ratio, non-symmetrical coding and fast decoding speed.

**Key words:** image compression; lifting scheme; non-symmetrical coding; vector quantization; fly-through