

文章编号:1001-9081(2007)09-2110-04

基于分段可逆矩阵变换的超光谱图像无损压缩算法

解成俊, 向阳

(北京大学 数字图像处理研究所, 吉林 吉林 132011)

(xcjciom@ yahoo. com. cn)

摘要:提出了一种新的分段可逆矩阵变换去除谱间冗余算法,结合 CDF(2,2)DWT 去除空间冗余,去冗余效果好于 3D-CDF(2,2)DWT,改进的 EBCOT 算法进行编码。实验结果表明,无损压缩性能远好于 JPEG-LS、WinZip、ARJ、DPCM、中国科学院一小组、NMST、MST 的结果,以 JPL 的 Canal 测试图像为例,平均而言无损压缩比分别比上述算法提高了 43%、38%、36%、31%、17%、13%、10% 左右。该算法运算速度快,便于硬件实现。

关键词:分段可逆矩阵变换;相关冗余;无损压缩;改进的 EBCOT 算法

中图分类号: TP751 **文献标志码:** A

Study on lossless hyper-spectral image compression algorithm based on subsection invertible matrix transform to eliminate spectral redundancy

XIE Cheng-jun, XIANG Yang

(Institute of Digital Images Processing, Beihua University, Jilin Jilin 132011, China)

Abstract: This paper presented a new algorithm based on subsection invertible matrix transform to eliminate spectral redundancy, and 2D-CDF (2, 2) DWT was used together to eliminate spatial redundancy. Its redundancy elimination effect is better than that of 3D-CDF (2, 2) DWT. The experimental results show that in lossless image compression applications the method is much better than JPEG-LS, WinZip, ARJ, DPCM, the research result of a research team of Chinese Academy of Sciences, NMST and MST. Using Canal test images of JPL laboratory as an example data set, on the average the compression ratio using this algorithm increases by 43%, 38%, 36%, 31%, 17%, 13%, and 10% respectively compared to the above algorithms. The algorithm presented in this paper has advantages in computing efficiency and hardware realization convenience.

Key words: subsection invertible matrix transform; related redundancy; lossless image compression; improved EBCOT algorithm

超光谱图像是一种三维立体图像,由于其图像信息十分宝贵,一般采用无损压缩^[1]。目前,一直没有形成一套成熟或标准的超光谱图像压缩技术^[2]。

超光谱图像存在谱间相关冗余和空间相关冗余,谱间冗余是由于成像设备的频谱交叠,地物反射频谱覆盖了较大范围,空间冗余来自自然图像固有的平滑性,这些冗余都表现出明显的非平稳性,冗余的去除还有许多理论和技术难点仍待解决,是超光谱图像压缩的核心步骤^[3],对提高压缩效率具有重要作用,主要有预测和变换等方法^[4],关于这一问题的研究引起了该领域学者的极大兴趣^[5-9]。本文提出了一种新的矩阵变换算法,该算法还可以结合 CDF(2,2)DWT 或减影变换实现谱间去冗余,这样的混合变换可以避免谱间 DWT 的边界延拓问题,用 CDF(2,2)DWT 实现空间去冗余,改进的 EBCOT 算法进行压缩编码。本文算法可以有有效的提高压缩效率,关于这一主题研究未见报道。

1 谱间相关性分析及矩阵变换

1.1 谱间相关性分析

超光谱图像的空间相关性是指每个谱段内某一像素与其相邻像素之间的相似性。通常超光谱图像的空间相关性低于

一般普通图像^[9],因为超光谱遥感图像涉及到的目标多、范围大、细节多、纹理丰富,其结构特征很难有整体的一致性,因此像素值连续性差,相关性低。本文用 CDF(2,2)小波提升变换来实现空间相关冗余的去除。

谱间相关性是指各波段(Band)光谱图像在同一空间位置的像素有相似性,产生这种相似性的原因有以下两点:1)超光谱图像的每个波段图像的像素值,是相同区域地物对各个波段光的反射强度值,相邻波段的地物反射率是相近的,由此产生了一定的相关性;2)由于不同波段的图像所涉及的地面目标相同,它们具有相同的空间拓扑结构。

为了分析谱间相关性,引入互相关函数的概念。定义某一指定 Band 图像 f_n 同 f_i 的谱间相关系数为:

$$R_{i,n} = \frac{\sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N [f_i(x,y) - \bar{f}_i] \cdot [f_n(x,y) - \bar{f}_n]}{\sqrt{\left\{ \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N [f_i(x,y) - \bar{f}_i]^2 \right\} \cdot \left\{ \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N [f_n(x,y) - \bar{f}_n]^2 \right\}}}$$

其中 \bar{f}_i 为 f_i 的灰度均值, M 、 N 分别为单帧图像的长和宽。相邻波段 i 、 $i+1$ 的互相关系数为 $R_{i,i+1}$, 简写成 R_i 。

收稿日期:2007-03-09;修回日期:2007-05-21。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60672156);吉林省科技厅项目(20060519)。

作者简介:解成俊(1962-),男,吉林汪清人,教授,博士,主要研究方向:遥感图像处理、EDA;向阳(1963-),男,吉林长春人,研究员,博士,主要研究方向:遥感信息处理、光信息处理。

测试的超光谱图像 Canal 为美国 JPL 实验室研制的 AVIRIS 在加拿大运河平原地区所拍摄的,图像参数为:200 行、200 列、223 波段(Bands)、每个像素 2 个字节;拍摄地点:Canal Flat,北纬 50.0667°,西经 115.5917°;拍摄高度:19860 m;光谱分辨率:10 nm;光谱范围:400~2400 nm。相邻波段的谱间互相关系数 R_i 见图 1。

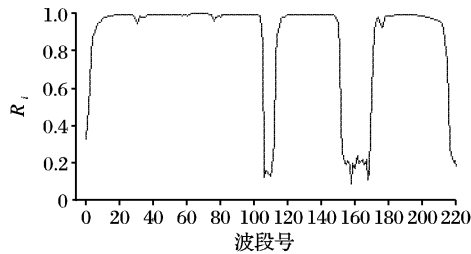


图1 相邻波段的相关系数

由图 1 可知,第 106~113 波段和第 152~157 波段,第 217~222 波段谱间相关性有非常明显的下降。可以将整个超光谱图像分成 5 个部分,可以根据谱段相关性的不同分组进行变换。但笔者发现已公开的去除谱间冗余的预测和变换等并没有有效地提高压缩比,因此提出基于分段的矩阵变换来去除谱间冗余,提高超光谱图像压缩的效果。

1.2 可逆矩阵变换

笔者提出利用可逆矩阵变换来实现谱间冗余的去除,受彩色变换的启发,可以利用 3 个波段的分组来实现谱间冗余的去除,同时可以结合谱间 DWT 或减影变换可以避免 DWT 的边界延拓。在 RGB、YUV、YIQ、YCbCr、YDbDr、YPbPr、YUW、XYZ、HSI、HLS、HSV、CMYK、YCoCg、YFrFb、SHIRCT、RCT、LYUV 这些变换的基础上总结出一个改进的 3D 可逆矩阵变换来实现谱间冗余的去除,对提高压缩效率起到了重要作用,具体变换矩阵如下:

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/2 & 3/4 & 3/4 \\ 163/128 & -147/256 & -51/256 \\ 5/16 & -21/32 & 11/32 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix}$$

在变换矩阵中, y_1 分量类似于 DWT 的低频分量,所以对变换后多个 y_1 分量进行减影变换,以便进一步去除冗余。

2 改进的 EBCOT 算法

EBCOT 算法是将小波变换后的子带分成系数矩阵块,并独立地在这些“码块”上执行位平面编码。通常这些数据块的大小是 64×64 或 32×32 。EBCOT 将编码分成四部分,即重要性编码、符号编码、“0”的 RLC 编码、基于上下文的自适应二进制算术编码(Context-based Adaptive Binary Arithmetic Coding, CABAC)。本文在此算法的基础上作一些改进。

2.1 基于 Rice 码的 RLC 编码

本文 RLC 编码采用 Rice 码实现,Rice 码由基本序列(Fundamental Sequence, FS)和劈分(Sample Splitting)两个部分组成。FS 是一种变长码,码字唯一不需要码本。给定编码参数 k ,对于一个 n 位数据,编码时,首先对 $n-k$ 个最高有效位使用 FS 进行编码,接着直接用二进制编码随机的 k 位,然后使用 FS 编码后的结果与 k 位 LSB(Least Significant Bit)相连形成 Rice 码。Rice 编码需要对参数 k 进行有效的估计,Rice 码通常采用后缀定长的码,笔者采用后缀非定长的码,其码字的形成见 2.3 节的第 3 步。

2.2 DWT、减影变换及编码块处理

在 EBCOT 算法中,变换对压缩效果的影响非常明显,在

普通的图像压缩中,仅涉及二维 DWT,但在超光谱图像压缩中涉及的是三维图像变换,即一维谱间变换和二维空间 DWT,下面叙述本文的实现过程。

2.2.1 空间 DWT

二维空间 DWT 利用 CDF(2,2) 双正交小波,采用对称延拓实现基于整型数运算的可逆双正交小波变换,变换如下:

正变换:

$$d(n) = x(2n+1) - \left[\frac{x(2n) + x(2n+2)}{2} \right]$$

$$s(n) = x(2n) + \left[\frac{d(n-1) + d(n)}{4} \right]$$

逆变换:

$$x(2n) = s(n) - \left[\frac{d(n-1) + d(n)}{4} \right]$$

$$x(2n+1) = d(n) + \left[\frac{x(2n) + x(2n+2)}{2} \right]$$

设进行 J 级小波变换,则变换后各子带分别为 $LL_J, HL_J, LH_J, HH_J, \dots, HL_1, LH_1, HH_1$ 。将图像进行“穷尽”离散小波变换,则 LL_J 可能仅包含一个像素,为实现有效的编码,从第 J 级到第 s 级作为一个编码块($LL_J, HL_J, LH_J, HH_J, \dots, HL_s, LH_s, HH_s$),然后依次将每级的 3 个高频子带各作为一个编码块进行编码,即 $HL_{s-1}, LH_{s-1}, HH_{s-1}$ 作为独立的编码块, \dots, HL_1, LH_1, HH_1 作为最后一个编码块。这样作可以提高基于 Rice 码的 RLC 编码效率。

2.2.2 谱间可逆矩阵变换和减影混合变换

在此没有采用三维 DWT 的重要原因是,在谱间方向 DWT 可能涉及边界延拓的问题,通常在 3 种边界延拓方法中(零延拓、对称延拓、周期延拓)对称延拓的压缩效果比较好,但是在谱间方向延拓一点就是一帧,这个数据量是相当大的,严重影响了压缩效率。设参与压缩编码的超光谱图像共 P 帧而且 P 可以表示为:

$$P = 3n + Q$$

也就是说,将 P 帧超光谱图像分成两组,第一组:共 $3n$ 帧;第二组: Q 个单帧部分($Q < 3$),谱间变换包含两步:

第 1 步: Q 个单帧进行相邻帧的减影变换,其中有一个参考帧在第一组中选出。

第 2 步:针对 $3n$ 帧分别作 n 次矩阵变换,变换后出现 n 个低频帧 y_1 ,对这 n 个部分还需进一步去冗余,具体办法是以其中的某一变换后的帧 y_1 为参考帧作减影变换,这样做可以进一步提高压缩效率。

2.3 重要性、符号、Rice 码的 RLC 编码算法

设系数块: $\{U_i | 0 \leq i \leq L-1\}$, $U_i = \pm b_m b_{m-1} \dots b_0$; v : 代表位平面; F_i : 已出现像素 U_i 最高有效位的标志, $F_i = 1$ 意味着已找到了 U_i 最高有效位; n : 代表比特位为零的求和; k : 零计数自适应调节因子。

第 1 步:初始化,对所有 i 置 $F_i = 0, v = 0, k = 0$,计算系数块 $\{U_i | 0 \leq i \leq L-1\}$ 的最高有效位 v_{\max} 。

第 2 步:计算 $b_v =$ 第 v 个位平面 $|U_i|$ 的比特值,将集合 $\{b_v\}$ 分成两组,即:

$$B_s = \{b_v | F_i = 0\}$$

$$B_R = \{b_v | F_i = 1\}$$

其中: $v = v + 1$ 。

第 3 步:如果 $B_s \neq \emptyset$,对于 B_s 中每一元素,按元素排列的增序做:

$$\text{if } (b_v = 0) n = n + 1;$$

```

if ( $b_v = 1$ ) {
  while ( $n > (1 << k)$ ) {
    输出 0;  $n = n - (1 << k)$ ;  $k++$ ;
    输出 1; 输出  $k$  位  $n$  值; 输出  $n$  的符号;
     $n = 0$ ;  $k--$ ;
  }
  while ( $n > (1 << k)$ ) { 输出 0;  $n = n - (1 << k)$ ;  $k++$ ;
if ( $n > 0$ ) { 输出 0;  $n = n - (1 << k)$ ;  $k++$ ;

```

第 4 步: 如果 $B_R \neq \emptyset$, 对于 B_R 中每一元素, 按元素排列的增序做: 输出 b_v 。

第 5 步: 如果 $v < v_{\max}$, 返回第 2 步, 否则结束。

2.4 CABAC 编码

第 1 步: 根据相邻已编码符号的信息, 为当前符号选择合适的上下文模型。

第 2 步: 对输入符号作 CABAC 编码。

压缩算法实现流程如图 2 所示。

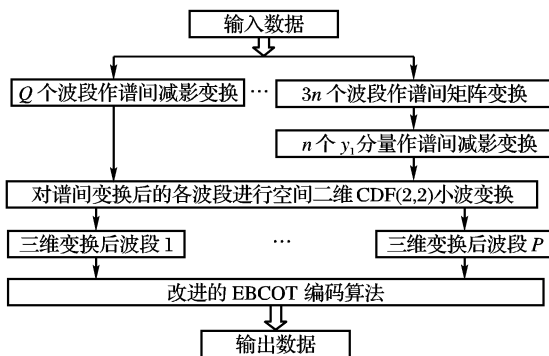


图 2 压缩算法实现流程

3 实验结果与分析

为了和其他研究小组的研究结果进行比较, 在此选择 Canal 超光谱图像的 Band24 ~ Band37 共 14 个波段的数据以及 Band21 ~ Band30 共 10 个波段的数据进行实验, 因为在这些波段上有可以对比的研究结果, Band22 ~ Band37 共 16 个波段的数据进行实验同 3D 小波变换做压缩效果的比较。

3.1 算例一: Canal 的 16 个波段对比压缩实验

算法	压缩比
3D-CDF(2,2) DWT	2.2693
本文算法	2.2815

在此之所以选择 16 个 Bands 作对比压缩实验, 是因为 16 波段数据做谱间 CDF(2,2) 小波变换可以做到完全变换以及不需要边界延拓, 即低频分量只有一个数据, 实施谱间变换后再对变换后的各个波段图像进行空间二维 CDF(2,2) 小波提升变换去除空间冗余, 然后对其进行 EBCOT 压缩编码。但是从对比实验结果可知本文变换仍然好于 3D-CDF(2,2) DWT, 并且压缩比提高了约 0.02 dB, 由此可见, 本文提出的变换具有良好的谱间去冗余能力。

3.2 算例二: Canal 的第 21 至 30Band 对比压缩实验

对超光谱图像 Canal 的第 21 至 30Band (共 10 个 Bands) 数据进行了测试。实施谱间矩阵变换后再对变换后的各个波段图像进行空间二维 CDF(2,2) 小波提升变换去除空间冗余, 然后对其进行 EBCOT 压缩编码。为了说明这种情况下不适合谱间 DWT, 仍然给出压缩实验结果, 实施 CDF(2,2) DWT 去除谱间冗余, 由于 10 个波段不能直接进行 DWT, 所以必须进行 6 点的边界延拓, 但是在谱间边界延拓一点就多出

一帧的数据量, 因此只要参与变换的超光谱图像的帧数不是 2 的幂次, 建议不要利用 DWT 去除谱间冗余, 在此给出的结果不过是要说明问题而已, 如果一定要用 DWT 去除谱间冗余, 可以采用 DWT 和其他变换结合的形式进行。关于算例二典型的研究成果是文献 [9] (中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研究小组) 的最小生成树 (Minimum Spanning Tree, MST) 算法、近最小生成树 (Near Minimum Spanning Tree, NMST) 算法。对比压缩实验结果见表 2。

表 2 Canal 的第 21 至 30Band 各种典型压缩算法无损压缩结果比较

算法名称	压缩比	本文比文献[9]算法提高/dB	本文比文献[9]算法提高/%
NMST, 块 4 × 4	2.04	0.28	13.73
NMST, 块 2 × 2	2.06	0.26	12.62
MST	2.10	0.22	10.48
本文算法	2.32		

注: 在此给出谱间边界延拓的实验结果用于说明问题, 不对比 CDF(2,2) DWT 谱间对称延拓压缩比为 1.47。CDF(2,2) DWT 谱间周期延拓压缩比为 1.46。

由表 2 可以看出, 本文算法明显好于近最小生成树, 最小生成树算法的无损压缩结果, 平均提高 10% 以上。

3.3 算例三: Canal 的第 24 至 37 波段对比压缩实验

算法实施过程同上, 其具体方案如下:

12Bands (谱间矩阵变换) + 2Bands (谱间减影变换), 对变换后的 14 个 Bands 进行空间二维 CDF(2,2) 小波提升变换, 然后进行 EBCOT 压缩编码。

为了说明本算法的有效性, 本文和其他五种无损压缩算法进行了实验对比。JPEG-LS 是基于 LOCO-I 思想的无损压缩算法, 通过上下文模型和误差反馈有效降低误差图像的熵, 然后通过游程编码实现对误差图像的编码。WinZip 是 Microsoft 提出的著名的无损图像压缩方法。ARJ 方法采用的是单趟自适应 Huffman 无损压缩算法。DPCM 是典型的基于预测的无损压缩算法。文献 8 是基于位平面变换的超光谱无损压缩算法。对比压缩实验结果见表 3。

表 3 Band24-Band37 各种典型压缩算法无损压缩对比实验结果

典型算法	压缩比	本文比列出算法提高/dB	本文比列出算法提高/%
JPEG-LS	1.571	0.678	43.16
WinZip	1.627	0.622	38.23
ARJ	1.652	0.597	36.14
DPCM	1.715	0.534	31.14
文献[9]算法	1.913	0.336	17.56
本文算法	2.249		

从表 3 可以看出, 针对测试图像平均而言, 本文方法比 JPEG-LS 提高了 43% 左右, 比 WinZip 提高了 38% 左右, 比 ARJ 提高了 36% 左右, 比 DPCM 提高了 31% 左右, 比文献 [9] 研究小组提高了 17% 左右, 可见本文算法的压缩比要明显高于他们, 其原因在于本算法可以有效地去除超光谱图像的空间、谱间相关冗余, 使压缩编码的效率更高。

4 结语

本文提出的分段可逆矩阵变换和减影混合变换对去除谱间冗余很有效, 该算法对波段数是非 2 的幂次情况的一个补充, 这种情况下去除谱间冗余效果远好于 DWT, 即使波段数是 2 的幂次, 本文算法去除谱间冗余也略好于 CDF(2,2) 小波提升变换。USA-JPL 的 Canal 超光谱图像无损压缩实验结

果表明,无损压缩性能略好于 3D-CDF(2,2) DWT,远好于 JPEG-LS、WinZip、ARJ、DPCM、中国科学院一小组、NMST、MST 的结果。

参考文献:

- [1] 王晋, 张晓玲, 沈兰荪, 等. 一种基于网格编码量化的高光谱图像无损压缩方法[J]. 中国图象图形学报, 2006, 11(1): 123 - 127.
- [2] 张雷, 黄廉卿. 超光谱数据压缩技术[J]. 红外, 2005, (1): 9 - 12.
- [3] RYAN M J, ARNOLD J F. The lossless compression of AVIRIS images by vector quantization [J]. IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing, 1997, 35(3): 546 - 550.
- [4] DRAGOTTI P L, POGGI G, RAGOZINI A P R. Compression of multispectral images by three-dimensional SPIHT algorithm [J].

- IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing, 2000, 38 (1): 416 - 428.
- [5] 杜振洲, 周付根. 基于帧间去相关的超光谱图像压缩方法[J]. 红外与激光工程, 2006, 33(6): 642 - 645.
- [6] 张培强, 柴焱, 张晓玲, 等. 基于波段分组的 3D-SPIHT 高光谱图像无损压缩算法[J]. 中国图象图形学报, 2005, 10(4): 425 - 430.
- [7] 马晨光, 郭雷. 基于 3 维 SPIHT 编码的超光谱图像压缩[J]. 量子电子学报, 2005, 22(5): 682 - 684.
- [8] 李永峰. 遥感卫星高光谱图像压缩编码方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2004.
- [9] 刘恒殊. 超光谱遥感图像压缩算法的研究[D]. 长春: 长春光学精密机械与物理研究所, 2002.

(上接第 2096 页)

待处理的模型对象及其部位,面向四叉树的射线检测主要解决的是射线和包围盒的求交问题。整个检测过程可以采用图 4 中的步骤。首先计算射线和四叉树子节点相交情况,如果不相交则放弃遍历以该节点为根节点的整个子树,如果相交则继续遍历直到叶子节点为止,遍历至叶子节点后顺序遍历该叶子节点包含的所有模型包围盒,得出检测结果。

3.2 摄像机视锥体裁减^[6]

由于整个室外场景是摄像机视锥体中所有模型的透视投影,所以处于视锥体之外的所有模型将不出现在用户的视野中。因此,为了提高场景渲染速度,我们可以把摄像机视锥体以外的所有模型节点在渲染前进行事先剔除,不将它们送入渲染管道,避免不必要的渲染流程。整个流程与射线检测相似,首先判断四叉树子节点是否处于视锥体内,如果不处于内部则放弃遍历以该节点为根节点的整个子树;如果处于内部则继续遍历直到叶子节点为止,遍历至叶子节点后顺序遍历该叶子节点包含的所有模型包围盒,得出需要渲染的所有模型。

4 实验结果

根据本文提出的方法,在 VC.NET 的编译环境下使用 Direct3D 渲染某大规模场景,按照四叉树进行分块,并使用视锥体剔除技术使得渲染速度有了明显提高。渲染效果如图 5 所示。

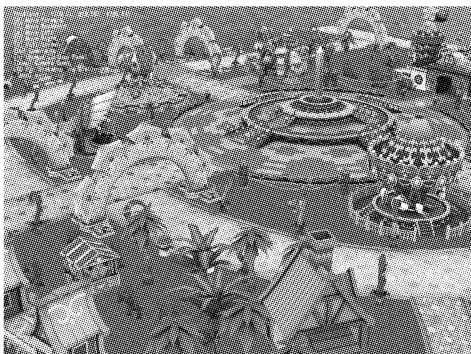


图 5 复杂室外场景渲染效果

实验平台: Intel 双核 2.4 GHz, Quadro FX 3450 (256 MB 显存), DDRII 667 (1 GB × 2), WD120 GB (7200 转)。

下面我们对大规模室外场景进行渲染,用顺序查找管理和四叉树管理两种方法做比较实验,在测试平台相同的情况下得到的测试结果如表 1 所示。

表 1 两种算法之间的对比

测试内容	顺序查找管理/F	四叉树管理/F	提高效率/%
321 878 个面、106 个节点	24	41	70.8
147 152 个面、57 个节点	57	83	45.6
25 272 个面、12 个节点	156	185	18.6

从测试结果可以看出,在面数和节点相同的情况下,相对于一般的顺序查找算法,利用本文所提到的改进型四叉树算法在渲染帧数上有较大提高。比较三次测试结果不难发现,在节点越多,面数越多的场景中,应用改进型四叉树管理后,显示帧数的速率提高表现得更加明显。因此我们不难得出这样的结论,在大规模室外场景实时渲染中,利用四叉树算法将大大提高显示效率,减少了 GPU 开销。该算法的主要优点就是将四叉树划分方法合理地应用到室外场景管理过程中,有效地提高了射线检测和视域剔除的效率,改进了原有的树节点递归生成算法效率,减少了堆栈的运算和使用,既符合工程开发流程,也减少了场景调入等待的时间。该算法可以作为场景管理模块添加到 3D 室外场景渲染引擎中,有效提高引擎对复杂室外场景的渲染效率,增加引擎的实用性。

参考文献:

- [1] TORBORG J G. Display techniques for octree-encoded objects [J]. IEEE Computer Graphics & Application, 1981, 1(3): 29 - 38.
- [2] PAJAROLA R. Overview of quadtree-based terrain triangulation and visualization [EB/OL]. [2007 - 03 - 10]. <http://www.ifi.uzh.ch/vmml/admin/upload/UCI-ICS-02-01.pdf>.
- [3] PAJAROLA R, SAINZ M, CONFETTI G. Object - space point blending and splatting [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2004, 10(5): 598 - 608.
- [4] GROSS M H, STAADT O G, GATTI G. Efficient triangular surface approximations using wavelets and quadtree data structures [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 1996, 2(2): 130 - 143.
- [5] CHAN Y K, CHANG C C. An efficient data structure for storing similar binary images [C] // Proceedings of the Fifth International Conference on Foundations of Data Organization (FODO '98). Kobe: [s. n.], 1998: 268 - 275.
- [6] GOVINDARAJU N K, SUD A, YOON S E, et al. Interactive visibility culling for complex environments using occlusion-switches [C] // Proceedings of the 2003 Symposium on Interactive 3D Graphics. Monterey: [s. n.], 2003: 103 - 112.