

基于边缘导向视觉测量图像的 LWP-SPIHT 精确编码

刘俊杰* 杨学友 叶声华

(天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室 天津 300072)

摘要: 为实现对视觉测量图像更加有效地稀疏表示, 尽可能地捕捉图像本身的几何特性, 该文首先提出一种基于灰度梯度方向预测边缘走向的方法, 精确定位图像边缘, 并在此基础上运用方向提升格式小波包(LWP)变换与普通提升小波包变换相结合的方式, 对整幅测量图像进行分解。其次, 采用的各个子带能量信息与方向信息和的代价函数, 有效地保持边缘信息的完整性。最后完善并解决了小波包变换在 SPIHT(Set Partitioning In Hierarchical Trees) 编码中产生的父子节点间的冲突问题。通过对视觉测量中的远、近景图像、局部放大图像以及靶标图像的测试证实, 基于边缘导向的提升格式小波包多级树集合分裂(LWP-SPIHT)的视觉测量图像压缩算法, 更好地保留了压缩后视觉测量图像的边缘信息, 改善了图像的重构质量和精度。

关键词: 图像处理; 图像编码; 灰度梯度方向; 方向提升小波包变换; 父子节点冲突

中图分类号: TN919.81

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2012)12-2795-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2012.00863

Precise Edge-directed LWP- SPIHT Encoding for Visual Measuring Image

Liu Jun-jie Yang Xue-you Ye Sheng-hua

(State Key Laboratory of Precision Measuring Technology & Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: In order to achieve sparse representation and capture more geometrical features of visual measuring image, a predicted method of edge information based on gray gradient direction is proposed first. Due to the precise positioning of edge, the method of combination of Lifting Wavelet Packet (LWP) transformation and general wavelet packet transformation is adopted to decompose the whole measuring image. Then the designed cost function maintained the integrity of edge information efficiently, that is the sum of energy mean of every sub-band and direction information. Finally, parent-child conflict of wavelet packet transformation in Set Partitioning In Hierarchical Trees (SPIHT) encoding is completed and resolved. By the test of distant view image, nearby view image, partial enlarged image and target image, the compression method for visual measuring image based on edge-directed LWP transformation SPHT encoding (LWP-SPIHT), preserved edge information of visual measuring image and enhanced the reconstructed quality and precision.

Key words: Image processing; Image encoding; Gray gradient direction; Direction lifting wavelet packet transformation; Parent-child conflict

1 引言

随着计算机硬件性价比的提高和信息技术的发展, 基于计算机视觉的精密测量以其柔性、快速、非接触、精确、自动化程度高等特点很快得到了全球化应用。图像是表达视觉信息的一种物理形式, 在利用计算机视觉对静态大尺寸乃至超大尺寸物体形貌进行精密测量时, 需要在物体表面粘贴一些已经编码的反光标志, 通过不同位置和方向获取的 3 幅及以上的图像来进行 3 维物体形貌重建, 最终解

算出所需要的尺寸参数。但由于大部分测量现场环境比较恶劣, 所以必须将大量图像数据远距离传输到计算机进行处理。所以, 为提高整个视觉测量系统的实时性, 减小传输的带宽, 迫切需要结合视觉测量类图像尺寸大, 边缘精度要求高, 几何特征明显等特性来设计一种简单快速的编码算法。图像编码从本质上说就是对要处理的图像数据源用一定的规则进行变换和组合, 从而达到以尽可能少的代码或者符号来表示尽可能多的数据信息的目的, 所以也常称为图像压缩。

目前, 基于小波的图像压缩算法, 由于其降低了数据存储的消耗和能在低比特率下传输等优良特性得到了越来越广泛的应用。但是, 传统的由 1 维

2012-07-09 收到, 2012-09-13 改回

国家自然科学基金重点项目(50735003)资助课题

*通信作者: 刘俊杰 362351554@qq.com

小波张成的2维可分离小波只具有垂直、水平和对角线的方向。方向性的缺乏使普通的小波变换不能充分捕捉图像本身的几何特性,图像边缘细节信息的损失导致边缘位置偏移,不能达到对边缘的精确定位,失去了对视觉测量图像压缩的意义。因此本文提出了一种方向提升的小波变换,并在提升过程中考虑了边缘的方向信息,其中边缘方向信息是由图像的灰度梯度方向角确定的。小波包变换是小波变换的推广,它通过对小波变换的高频部分作进一步分解,使信号频带划分更加精细,并且能够自适应地选择小波包基,以达到对原始信号的最优逼近,故选择小波包代替小波,其代价函数由各子带能量信息与方向信息的和决定的。但是小波包变换系数产生的父子关系不是简单像小波变换那样,在同一方向同一位置上除最精细子带节点之外每个父节点都只含有四个孩子节点,本文完善并解决了小波包系数在进行SPIHT编码时候存在的父子节点间冲突的问题。大量的实验证实,基于边缘导向的提升格式小波包多级树集合分裂算法(LWP-SPIHT)相比于小波SPIHT(WV-SPIHT)算法在客观评价标准峰值信噪比(PSNR)值和主观视觉效果上来看都有显著提高^[1]。

2 方向提升格式小波包变换

2.1 灰度梯度矩阵与方向预测

为建立方向提升格式,必须先获得图像内部的方向信息。曾孝平等^[2]利用图像的瞬时方差系数来获取方向提升小波变换的方向信息,张军等人^[3]利用图像矩阵偏差度来预测方向提升小波的方向,但是他们共同的缺点是将图像进行了自适应的分块处理,通常的将图像固定划分为几个区域,由于块边界与相邻区域也有相关性,所以只对其中一个区域进行操作而对相邻区域完全无关时会对其他区域产生混叠效应。本文提出基于灰度梯度方向来预测边缘方向信息的方法,首先把图像看成2维离散函数,原图像不做平滑处理,因为平滑会降低边缘信息的对比度,减少图像中的信号信息,然后求灰度梯度。图像梯度其实就是这个2维离散函数的求导^[4]:

$$\nabla G(i, j) = \left[\left(\frac{\partial G(i, j)}{\partial x} \right)_{ij}^2 + \left(\frac{\partial G(i, j)}{\partial y} \right)_{ij}^2 \right]^{1/2} = [G_x^2 + G_y^2]^{1/2} \quad (1)$$

由于计算复杂,在实际操作中,常用绝对值代替平方根运算近似求梯度模值。

$$\nabla G(i, j) = |G_x| + |G_y|$$

本文采用Sobel的梯度算子,所以

$$\left. \begin{aligned} G_x &= G(x-1, y+1) + 2G(x, y+1) + G(x+1, y+1) \\ &\quad - G(x-1, y-1) - 2G(x, y-1) - G(x+1, y-1) \\ G_y &= G(x-1, y-1) + 2G(x-1, y) + G(x-1, y+1) \\ &\quad - G(x+1, y-1) - 2G(x+1, y) - G(x+1, y+1) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

灰度梯度方向角

$$\theta = \arctan(G_y / G_x) \quad (3)$$

图像上的每个点都对应一个梯度方向,边缘可以看作是由具有特定方向的边缘像素点构成的。边缘在点 (i, j) 处的方向与此点处梯度向量的方向垂直。如图1(a), 1(b)所示,图1(b)中黑线表示的是边缘的走向,小箭头表示灰度梯度方向,其垂直于边缘。梯度的绝对值在边缘处取较大值,在均匀变化的区域处取较小值。为了节省存储空间对于较小的梯度值处不计算其梯度角,只有当梯度值超过某一阈值(最大模值和最小模值的均值)时才计算其梯度方向角 θ ,并记录当前的坐标和梯度方向角。

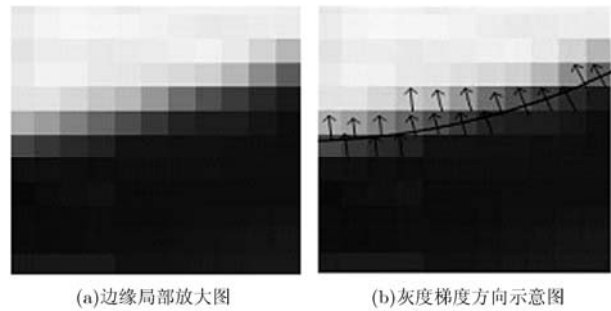


图1 边缘像素灰度梯度方向示意图

2.2 方向提升小波包变换

虽然小波变换在图像处理的理论和实验方面已经取得了一系列的成功,但由1维张量形成的2维小波在图像上的表示上仍旧不能很好地捕捉图像的几何特征,这对于视觉测量类图像高精度几何特征的要求来说是很难满足的。为提高视觉测量类图像的稀疏表达能力,使重构图像尽可能地保持边缘信息完整,本文使用小波包代替小波变换,如图2为典型的测试图片Tire的二层小波包分解。

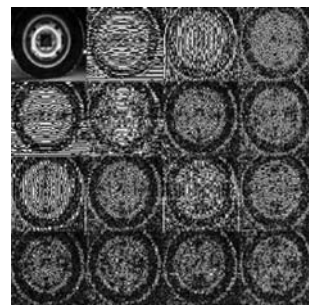


图2 Tire图像二层小波包分解

从图中清晰可见, 图像经过小波包分解后, 高频子带中蕴含着非常丰富的边缘信息, 且幅值较大的系数是表示图像边缘和线条的重要部分, 补充了图像经小波分解后几何特征缺失的不足。据统计分析, 小波包分解系数有如下特点: (1)不同尺度下对应同一空间位置的小波包系数间并不像多级小波分解那样存在着较强的相关性, 且系数间的相关性也与频带的方向性有关, 即 LH 方向中同行系数之间的相关性要强一些, HL 方向中同列系数之间的相关性要强一些, 而 HH 方向的频带及 LL 中则差不多, 这是由小波变换本身决定的; (2)最典型的概率分布为 Laplace 分布, 且有重要聚集性(通常幅值大的重要系数通常集中在若干个块中); (3)随着分辨率的降低, 系数的动态范围和方差逐渐变大; (4)同一分辨率上不同方向的子带间具有相似的动态范围。并且, 由于不同的图像的小波包系数具有不同的分布特性, 所以应该综合考虑各种因素用一组最能体现图像特征的基称为最优基来使得图像达到最优逼近, 选择小波包最优基的代价函数将在下节进行详细描述。

为提高编码效率、降低计算的复杂度, 滤波器采用提升格式, 提升是对完全重构滤波器的初步修正, 其实现形式给出了小波完全的空间域解析, 它具有结构简单、运算量低, 原位运算, 存储空间较小等诸多优良特性, 而且便于实现。提升算法给出了双正交小波简单而有效的构造方法, 它使用基本的多项式插补来获取信号的高频分量, 然后通过“保持信号的均值和高阶矩不变”的限制条件来获取信号的低频分量。提升方案通过分裂、预测、更新 3 步来完成。首先将信号分裂为奇偶两部分^[2,3,5-10]:

$$\left. \begin{aligned} x_e(m, n) &= x(m, 2n) \\ x_o(m, n) &= x(m, 2n + 1) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

在预测过程中, 基于原始数据相关性的基础上, 通过偶数部分 $x_e(m, n)$ 来预测奇数部分 $x_o(m, n)$, 预测误差为

$$h(m, n) = x_o(m, n) - Px_e(m, n) \quad (5)$$

$$x_o(m, n) = h(m, n) + Px_e(m, n) \quad (6)$$

其中 P 为预测算子, 只要 P 一定, 就可以由 $h(m, n)$ 和 $x_e(m, n)$ 完全恢复 $x_o(m, n)$, 进而恢复原始信号。在本文中, 由于上一节中得出的预测方向信息, 假设奇数部分在边缘信号点 (m, n) 的列方向为 $\theta - \pi/2$, 则修正预测算子沿着 $\theta - \pi/2$ 的方向, 因为灰度梯度方向与边缘的方向垂直, 灰度梯度方向为 θ , 故边缘方向为 $\theta - \pi/2$ 。则预测算子为

$$Px_e(m, n) = \sum_i p_i x_e(m + \text{sign}(i)\tan(\theta - \pi/2), n + i) \quad (7)$$

为了使原始信号的某些全局特性在其子集中继续保持, 必须对 $x_e(m, n)$ 进行更新, 将更新后的信号记为 $l(m, n)$, 即

$$l(m, n) = x_e(m, n) + U_h(m, n) \quad (8)$$

其中 U 为更新算子, 也要修正为 $\theta - \pi/2$ 的方向, 即

$$U_h(m, n) = \sum_j u_j h(m + \text{sign}(j)\tan(\theta - \pi/2), n + j) \quad (9)$$

在提升格式的每个过程中只需要利用相邻的有限个像素, 例如 5/3 和 9/7 小波滤波器, 每次提升仅需要相邻的 3 个像素, 并且预测边缘方向的 Sobel 的梯度算子也是通过行或者列方向上的相邻 3 个像素确定的, 前后保持了良好的一致性。有些点在边缘上, 梯度值较大, 记录其坐标值和像素本身的灰度梯度方向角, 采用方向提升小波包变换进行处理; 有些点在平滑区域没有对其进行计算和记录, 对于这些点, 采用普通的水平、垂直提升格式进行小波包变换; 不同的点采用不同的提升方式, 不仅节省了计算时间、提高编码效率, 而且也有利于保持边缘信息不被破坏。方向提升格式小波包变换具体步骤:

(1)计算所有像素点的梯度值, 取梯度的最大值和最小值的均值作为阈值;

(2)对于梯度值大于阈值的点, 记录其坐标值并计算其灰度梯度方向角 θ ;

(3)对于梯度值小于阈值的点, 不予以计算和记录;

(4)对整幅图像进行提升小波包变换, 梯度值小于阈值的点, 采用普通的水平、垂直提升格式小波包变换;

(5)梯度值大于阈值的点, 采用基于边缘方向修正算子的提升格式小波包变换。

3 代价函数

在设计基于方向提升小波包变换的 SPIHT 编码过程中, 代价函数的确定是最优基选择算法最重要的步骤之一。值得注意的是, 提升变换过程中的方向信息存在于图像的编码、传输和重构的各个过程中, 所以本文提出了一种新的选择最优小波包基的标准, 将边缘的方向信息与各个子带系数的能量信息和作为代价函数, 即

$$c = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \log_2(a_{i,j})^2 + \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N |d_{i,j}| \quad (10)$$

式中 M, N 表示子带的行列数, $d_{i,j}$ 表示方向信息。

方向提升格式小波包变换最优基选择步骤如下:

(1)用边缘导向的小波包变换对图像进行 N 层

分解;

(2)利用式(10)计算每个节点的代价函数;

(3)从叶子节点开始逐渐向上修剪四叉树,如果当前的不是叶子节点,且节点的代价值大于或等于其子节点代价值之和,则修剪掉此节点的子节点;否则,保留此节点的子节点作为最优基的一部分。

4 LWP-SPIHT 算法

小波系数具有能量聚集特性,大幅值的小波系数处在图像强度变化剧烈的区域内,尤其是在边缘处。对图像小波系数编码的关键是对其中显著系数的位置和幅度进行高效编码,因此充分利用小波系数分布特性是实现高效编码的正确途径。SPIHT 算法是一种有效利用多分辨率下高频子带相关性的方法,其量化策略最主要的推动力是通过开拓父子关系,对更精细尺度下相关高频子带小波系数重要性的预测。预测的能力越好,小波系数编码的效率越高。为了探究任意小波包基与 SPIHT 算法相结合的可能性,假设最优小波包基已选择完毕。但问题是小波包变换系数产生的父子关系不是简单像小波变换那样,在同一方向同一位置上除最精细子带节点之外每个父节点都含有 4 个孩子节点。父节点总是在比子节点更粗糙的一个尺度中,只有 4 个子节点,且层与层之间呈现出有规律的变化。即父节点 (i, j) 的子节点的坐标为: $O(i, j) = \{(2i, 2j), (2i, 2j + 1), (2i + 1, 2j), (2i + 1, 2j + 1)\}$ 。而小波包变换由于对某一尺度的某些高频分量进行再分解,使得空间方向树中的这种有序性发生了变化,例如有的子节点有多个父节点或者一个父节点的子节点数大于 4。以 4 层小波包分解为例(图 3 所示), R 表示最低频子带; H, V, D 分别表示水平,垂直,对角 3 个不同方向树的根节点,每个方向在下一精细尺度的子带都是其子节点。这样,可以定义如下 5 种类型父子关系^[11-15]:

(1)子节点位于父节点同方向上的更高一个尺度的子带上;

(2)子节点位于父节点同方向上的更高的不止一个尺度的子带上;

(3)子节点位于父节点同方向上的相同尺度的节点上;

(4)子节点位于父节点同方向上的更低一个尺度的子带上;

(5)子节点位于父节点同方向上的更低的不是一个尺度的子带上。

从以往学者的研究中发现^[13-17],对于类型(3),类型(4)的情况来说,可以直接利用与小波变换相同

的结构树进行编码。在文献[13]提出了类型(5)冲突的解决方法,将产生冲突的子节点只与其中一个父节点产生父子关系,这样一个父节点就不是仅仅对应一个子节点,而是应该对应 4^N , N 表示父子之间的尺度差异。对于类型(1),类型(2),文献[17]产生冲突的子节点上移并粘贴到与其尺度相同或者是更高尺度的节点上,作为其父节点。但是这样整个树的形状就发生了改变,不利于空间方向树的编码。因此,本文提出将产生冲突的节点进行父节点子带与子节点子带互换的方式解决父子间的冲突,如图 3 所示,经过互换后,既解决了父子冲突,也保持了空间方向树原有的规律性,更加适合于 SPIHT 编码。但值得注意的是,在解码中要按照同样的路径将父子节点换到原位^[13-17]。

5 实验

为验证本文提出的基于图像灰度梯度方向预测边缘走向的提升格式小波包变换的多级树集合分裂(LWP-SPIHT)方法的可行性,以及对视觉测量图像的压缩性能和对边缘完整性的保持的评价,采用 9/7 小波进行 5 层方向提升小波包变换对试验中的远景测量图像(1024×1024)、近景测量图像(512×512)、远景图像局部放大图像(256×256)、近景局部放大图像(256×256)以及精密平面靶标图(512×512),分别从 PSNR 值、图像的视觉质量以及边缘保持效果 3 方面进行测试。重构图像客观评价标准 PSNR 值是相对于原图像而言的,定义如下:

$$\text{PSNR} = 10 \lg \frac{255^2}{\frac{1}{MN} \sum_i^M \sum_j^N (f(i, j) - g(i, j))^2} \quad (11)$$

从式(11)中可以看出,当重构图像的质量越逼近原图像时,PSNR 值越大,反之则越小。图 4 为 PSNR 值比较结果,从图 4(a), 4(b)两图可以看出对于尺寸较大的远景和近景图图像来说,本文的 LWP-SPIHT 算法较 WV-SPIHT 算法并没有什么太突出的优势,但从局部放大图(图 4(c), 图 4(d))中可以明显看出,这说明当边缘信息所占比例越大时,整个图像的重建效果越好。图 5 为 2 种不同算法视觉效果比较。

在靶标图像测量试验中,保证每个反光标识为严格的圆,规定左上角的点为标准点,并选取其左右对角线方向的 8 个点为观测点,标记为 1-8。如图 6(a)所示,其重构图像为图 6(b)。原图像与重构图像观测点的中心坐标分别为 $(x_0, y_0), (x, y)$,单位为像素。从表 1 对照结果来看。横坐标 x 偏移不超过 0.8 个像素,纵坐标 y 偏移不超过 0.7 个像素,半

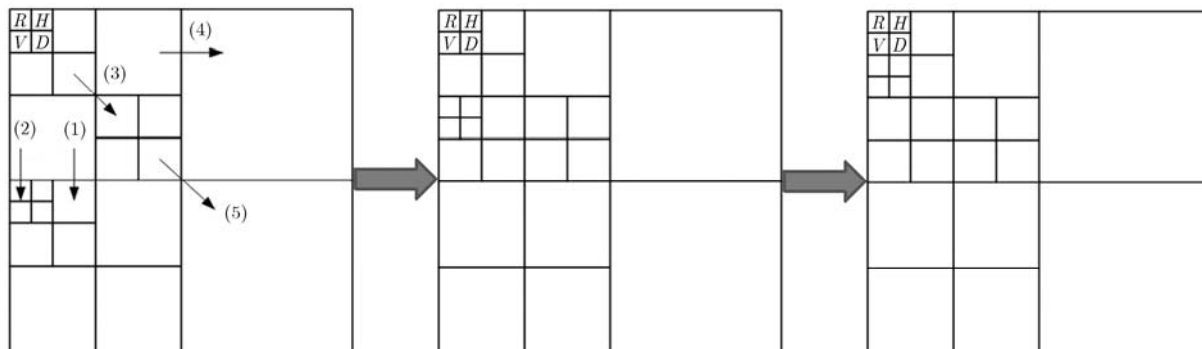


图3 父子节点间冲突及解决方案示意图

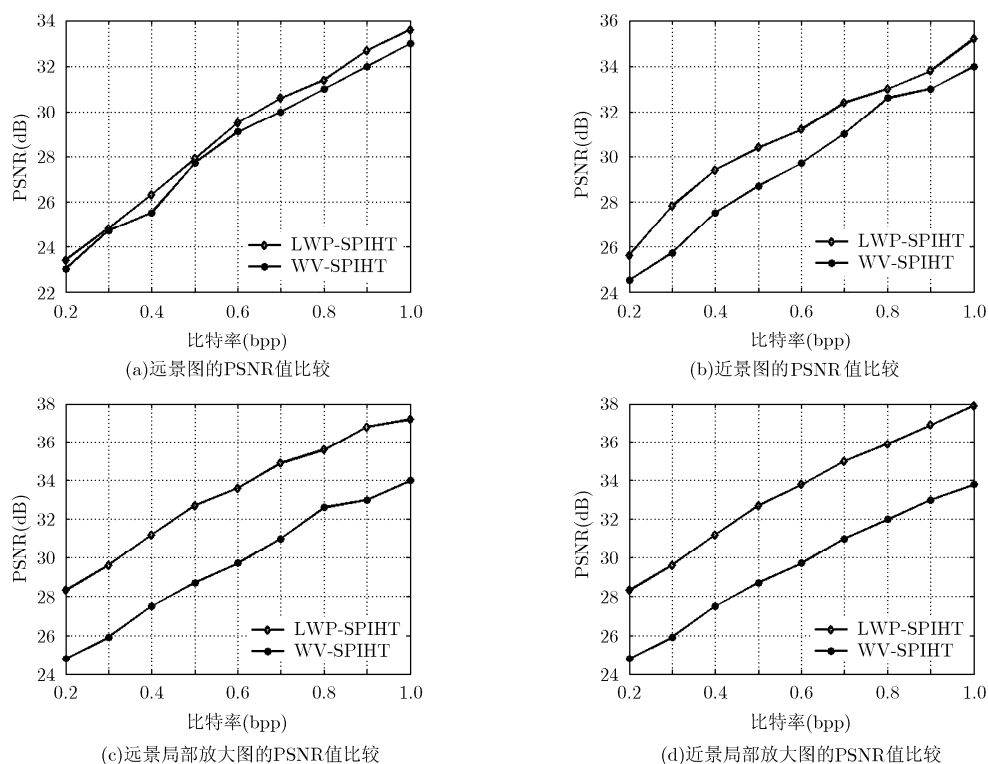


图4 PSNR 值比较

表1 靶标图像中心与半径的测量结果

观测点	坐标 x_0	坐标 x	$x-x_0$	坐标 y_0	坐标 y	$y-y_0$	原图像点半径	重构图像点半径	半径误差
1	32.074	32.141	0.770	27.994	27.365	-0.629	18.259	18.023	0.236
2	94.265	93.837	-0.428	90.823	91.007	0.184	19.014	19.407	0.393
3	158.167	158.326	0.159	154.370	153.812	-0.558	17.905	17.800	0.105
4	221.983	222.309	0.326	218.912	219.559	0.647	28.763	28.223	0.540
5	222.044	221.759	-0.285	27.090	27.737	0.643	18.950	18.903	0.047
6	159.483	158.778	-0.705	91.289	91.490	0.201	19.391	19.409	0.018
7	94.901	94.843	-0.058	154.332	154.137	-0.195	18.439	18.801	0.362
8	30.309	31.097	-0.788	216.303	216.759	0.456	18.595	18.263	0.332

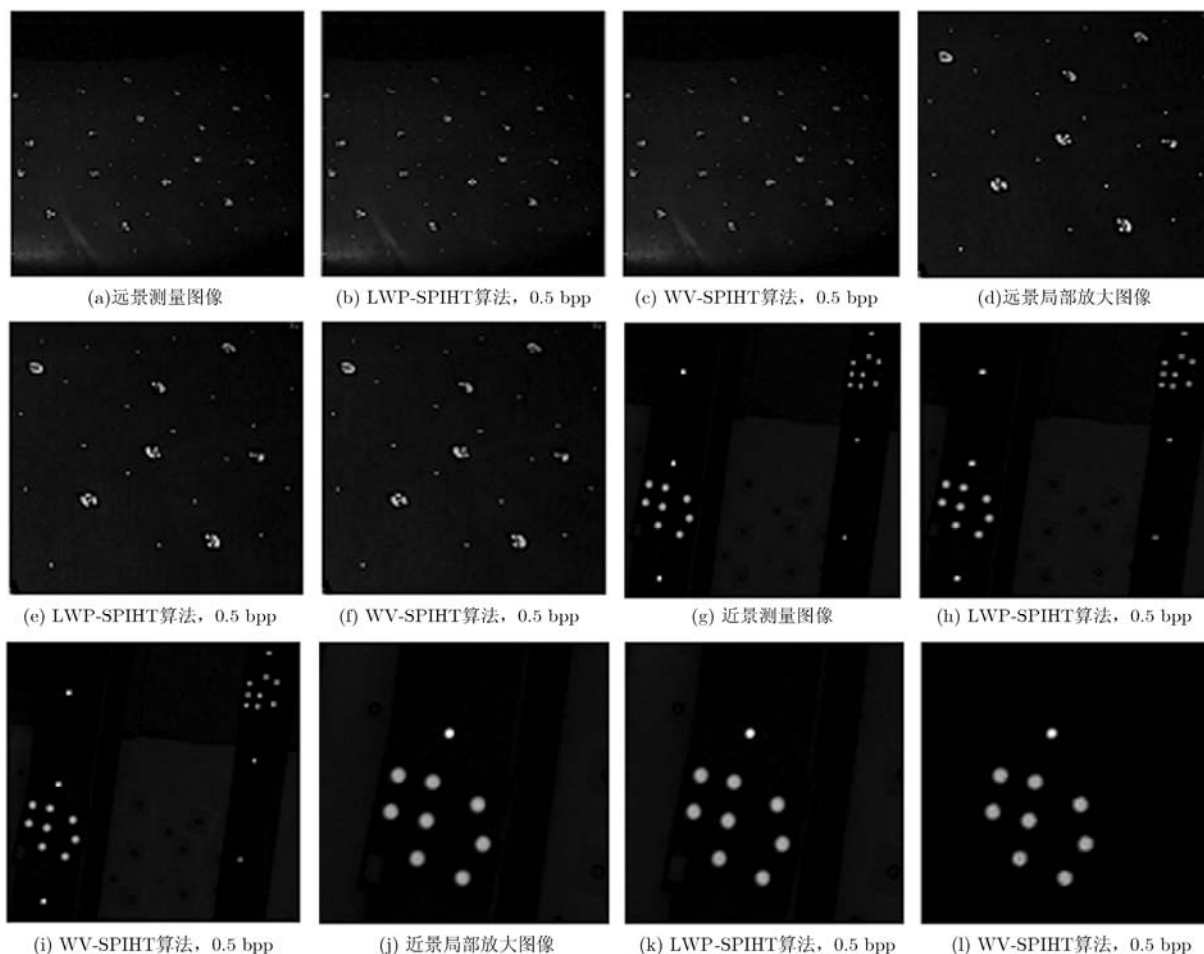


图5 LWP-SPIHT与WV-SPIHT压缩效果比较

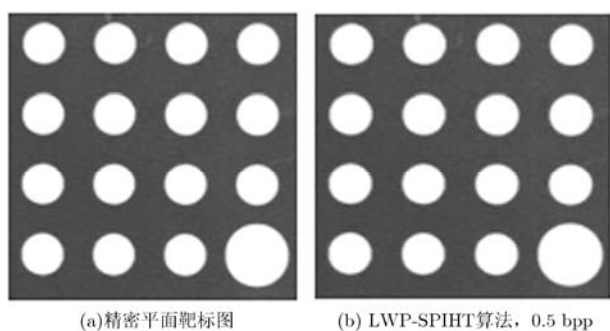


图6 靶标图像压缩效果比较

径误差不超过 0.6 个像素, 足以说明图像中反光标志的边缘在压缩中的损失微乎其微, 达到了保持边缘完整性的效果。

6 结束语

本文针对视觉测量图像数据量大、对边缘精度要求较高的特点, 提出了一种有效保持边缘信息完整性的图像编码方法。利用灰度梯度方向预测边缘走向, 并结合方向提升小波和普通提升的优点, 在

编码复杂度和效率之间达到了均衡, 其中梯度阈值的选择也是十分关键的。通过选择的各个子带能量信息与方向信息的代价函数, 捕捉了尽可能多的几何特性信息。在 SPIHT 编码过程中, 将产生冲突的父子节点的子带互换, 保证了空间方向树的结构不变且更利于编码。通过对大量视觉测量图像的实验证实, 基于边缘导向的提升格式小波包多级树集合分裂(LWP-SPIHT)算法是一种有效且精确的视觉测量图像压缩算法, 但目前算法计算复杂度较高, 需进一步改善算法性能, 降低复杂度, 便于硬件实现并且适用于任意尺寸视觉测量图像的压缩。

参考文献

- [1] 娄军, 金添, 宋千, 等. 高分辨率 SAR 图像散射中心特征提取[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(7): 1661-1666.
Lou Jun, Jin Tian, Song Qian, et al. Feature extraction of scattering centers in high-resolution SAR image[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(7): 1661-1666.
- [2] 曾孝平, 郑赞, 刘国金. 一种自适应的方向提升小波压缩算法[J]. 数据采集与处理, 2009, 24(5): 600-603.

- Zeng Xiao-ping, Zheng Zan, and Liu Guo-jin. Image compression algorithm based on direction-adaptive wavelet lifting[J]. *Journal of Data Acquisition & Processing*, 2009, 24(5): 600-603.
- [3] 张军, 成礼智, 杨海滨, 等. 基于纹理的自适应提升小波变换图像压缩[J]. *计算机学报*, 2010, 33(1): 184-192.
- Zhang Jun, Cheng Li-zhi, Yang Hai-bin, *et al.* Adaptive lifting wavelet transform and image compression via texture[J]. *Chinese Journal of Computers*, 2010, 33(1): 184-192.
- [4] 贾倩倩, 王伯雄, 罗秀芝. 光切法形貌测量中光条中心的亚像素提取[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(2): 390-396.
- Jia Qian-qian, Wang Bo-xiong, and Luo Xiu-zhi. Extraction of central positions of light stripe in sub-pixel in 3D surface measurement based on light sectioning method[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(2): 390-396.
- [5] Vidyadhar Gupta and Krishna Raj. An efficient modified lifting based 2-D discrete wavelet transform architecture[C]. Proceedings of the 2012 1st International Conference on Recent Advances in Information Technology, India, 2012: 832-837.
- [6] Ding Wen-peng, Wu Feng, Wu Xiao-lin, *et al.* Adaptive directional lifting-based wavelet transform for image coding[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2007, 16(2): 416-426.
- [7] Hou X, Jiang G, *et al.* Directional lifting wavelet and universal trellis-coded quantisation-based image coding algorithm and objective quality evaluation[J]. *IET Image Processing*, 2011, 5(8): 693-702.
- [8] Liu Guo-jin, Zeng Xiao-ping, *et al.* A novel direction-adaptive wavelet based image compression[J]. *International Journal of Electronics and Communications*, 2010, 64(6): 531-539.
- [9] Zhao Chong, Sun Han-qiu, and Qin Kai-huai. Efficient wavelet-based geometry compression[J]. *Computer Animation and Virtual Worlds*, 2011, 22(2): 307-315.
- [10] Huang Jin-cai, Cheng Guang-quan, Liu Zhong, *et al.* Synthetic aperture radar image compression using tree-structured edge-directed orthogonal wavelet packet transform[J]. *International Journal of Electronics and Communications*, 2012, 66(3): 195-203.
- [11] Rajpoot M, Wilson G, *et al.* Adaptive wavelet packet basis selection for zerotree image coding[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2003, 12(12): 1460-1472.
- [12] Meyer G, Averbuch Z, *et al.* Fast adaptive wavelet packet-image compression[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2000, 9(5): 792-800.
- [13] Sun Feng and He Jin-Peng. The same-level subbands correlation removed based SPIHT image coding algorithm[C]. Proceedings of the 2007 International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition, Beijing, China, 2007: 163-168.
- [14] Zhang Ning, Jin Long-xu, Wu Yin-hua, *et al.* Improved fast SPIHT image compression algorithm for aerial applications [J]. *Journal of Multimedia*, 2011, 6(6): 494-501.
- [15] Sprljan N, Grgic S, and Grgic M. Modified SPIHT algorithm for wavelet packet image coding[J]. *Real-Time Imaging*, 2005, 11(5-6): 378-388.
- [16] 杨晓, 杨学友, 叶声华. 低码率下任意形状感兴趣区域编码[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(4): 896-905.
- Yang Xiao, Yang Xue-you, and Ye Sheng-hua. Arbitrary shape ROI image encoding at low bit rate[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(4): 896-905.
- [17] Pan Hong, Siu Wan-chi, and Law Ngai-fong. A fast and low memory image coding algorithm based on lifting wavelet transform and modified SPIHT[J]. *Signal Processing: Image Communication*, 2008, 23(3): 146-161.
- 刘俊杰: 女, 1985年生, 博士生, 研究方向为视觉测量中图像编码。
- 杨学友: 男, 1949年生, 教授, 博士生导师, 主要从事视觉检测技术及应用研究。
- 叶声华: 男, 1934年生, 教授, 博士生导师, 中国工程院院士, 主要从事激光及广电测量技术方面的研究。