

WMSN 节点的低内存开销图像压缩方法*

陆明洲¹ 沈明霞¹ 刘志强¹ 刘龙申¹ 杨晓静² 王宇³

(1. 南京农业大学江苏省现代设施农业技术与装备工程实验室, 南京 210031;

2. 南京农业大学农业部动物生理生化重点实验室, 南京 210095;

3. 东南大学信息科学与工程学院, 南京 211189)

摘要: 基于比特平面及二值自适应算术编码提出了一种逐行小波系数编码方法,该方法能与低内存开销的逐行小波变换无缝、高效对接。处理器从图像节点 FIFO 通道中逐行读出图像信息,完成多级小波变换后,根据各层小波系数概率分布确定量化值,利用4个二值概率模型对系数各比特平面执行二值自适应算术编码,实现了基于小波变换的低内存开销图像压缩。利用该压缩方法处理一幅320像素×240像素仔猪灰度图像,结果表明,量化位数取3位时,存储开销、时间开销及峰值信噪比为5.749 KB、16.312 s及39.72 dB,内存开销低且重构图像质量较高。

关键词: 多媒体传感器网络 图像压缩 低内存系数编码 比特平面 二值算术编码

中图分类号: TP29; TN911.73 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)11-0292-06

引言

近年来,研究人员针对农业生产信息监测应用特点设计了图像传感器节点^[1-2],尝试利用无线多媒体传感器网络^[3](Wireless multimedia sensor network, WMSN)采集更加丰富的农业生产信息^[4]。静态图像数据对 WMSN 无线信道而言过于庞大,传输前需要执行图像压缩操作以减少图像信息量^[5]。基于离散小波变换的 JPEG2000 是当前主流的静态图像压缩标准,但大量的浮点运算操作以及过大的存储开销阻碍了其在 WMSN 节点上的应用。为此,研究人员提出了多节点分布式协同压缩思想^[6-7],将复杂的图像压缩任务分解到密集部署的多个网络节点上,但农业生产信息监测 WMSN(WMSN-agri)节点一般稀疏部署,分布式协同压缩方法并不适用。Pearson^[8]、Karlsson^[9]分别在 FPGA 处理平台及 DSP 平台上实现了单节点的片上图像压缩,这一类方法均对节点处理器平台提出了较高的要求。但成本限制使得 WMSN-agri 节点一般采用低内存的单片机级处理器,上述片上压缩方法也不适用。

基于小波变换的图像压缩一般由离散小波变换、系数量化以及系数编码3个步骤实现,文献[10]针

对 WMSN-agri 图像节点提出一种逐行小波变换方法,以低于4KB的内存开销得到了仔猪图像的小波变换系数,但并未就系数量化、编码提出配套解决方法。常用的小波系数编码方法有嵌入式零树小波编码算法(EZW)^[11]、多级树集合分裂算法(SPIHT)^[12]、嵌入式块最优截断编码算法(EBCOT)^[13]等,但EZW和SPIHT占用内存空间过大,EBCOT过于复杂,均不宜在逐行小波变换基础上应用。

本文针对逐行小波变换得到的各层系数概率分布确定量化值,利用4个二值概率模型对系数各比特平面^[14]执行二值自适应算术编码^[15],实现逐行取出图像像素值,同时完成该行像素的3级小波变换、系数量化及编码操作的目标,为逐行小波变换系数提供配套的系数量化与编码方案,解决 WMSN-agri 节点的低内存图像压缩问题。

1 图像逐行小波变换

文献[10]提出了一种基于 Le Gall 5/3 滤波器的逐行小波多级变换方法,其中,低通、高通滤波器系数如表1所示。

对于 WMSN 图像节点采集到的一幅 M 行 N 列灰度图像,逐行2级小波变换方法可用图1描述。

收稿日期:2013-12-27 修回日期:2014-02-08

* 农业部公益性行业科研专项资助项目(201003011)、江苏省产学研联合创新资金资助项目(BY2012207)和南京农业大学青年科技基金资助项目(KJ2011021)

作者简介:陆明洲,副教授,主要从事智能化设施农业研究,E-mail:lmz@njau.edu.cn

通讯作者:沈明霞,教授,博士生导师,主要从事机器视觉与信息农业领域研究,E-mail:mingxia@njau.edu.cn

表 1 Le Gall 5/3 滤波系数

Tab.1 Filter coefficients of Le Gall 5/3

j	低通滤波系数 A_l	高通滤波系数 A_h
0	6/8	1
± 1	2/8	-1/2
± 2	-1/8	0

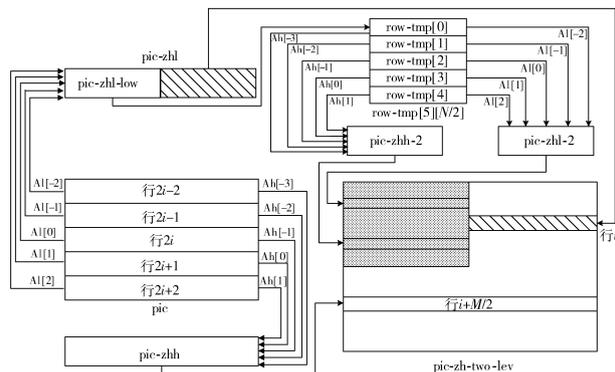


图 1 2 级逐行小波变换示意图

Fig. 1 Two level line based wavelet transform

图 1 表明, WMSN 图像节点处理器对于取出的每行图像数据执行以下 3 个步骤完成小波变换操作:

(1) 执行低通、高通滤波。

(2) 将行滤波结果分别乘以 $A_l[k]$ 及 $A_h[k-1]$ 并累加得到 2 级逐行小波中间变换向量 $pic-zhl-2$ 及 $pic-zhh-2$ 。row-tmp 中 5 行数据执行完上述两步操作后, 将 $pic-zhl-2$ 及 $pic-zhh-2$ 分别写入图 1 中 $pic-zh-two-lev$ 左上方灰色背景部分的行 $i/2$ 及行 $i/2 + M/4$ 。

(3) 将 row-tmp 数组各行向下移动 2 行, 则 row-tmp[3]、row-tmp[4] 移出数组, row-tmp[0] 及 row-tmp[1] 空出。分别读取原始图像以 $pic[2(i+1)]$ 及 $pic[2(i+2)]$ 为中心的 5 行图像区域执行文献[10]中的 1 级图像逐行小波变换, 将各次生成的 $pic-zhl-low$ 元素写入 row-tmp[0] 及 row-tmp[1], 回到步骤(1)。当原图像行号 i 从 0 遍历到 $M/2 - 1$, 图像 2 级小波变换完成。

2 逐行小波系数量化编码方法

2.1 系数量化

采用峰值信噪比 R_{PSNR} 衡量图像重构质量优劣, 其计算公式为

$$R_{PSNR} = 10 \lg \left(\frac{(2^n - 1)^2}{r_{MSE}} \right) \quad (1)$$

式中 n ——图像像素点的二进制位数

r_{MSE} ——重构图像 g 与原图像 f 的均方误差, f, g 均为 M 行 N 列图像

r_{MSE} 的计算公式及其分子展开式为

$$r_{MSE} = \frac{\sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{M-1} (g(x,y) - f(x,y))^2}{MN} \quad (2)$$

$$\sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{M-1} (g(x,y) - f(x,y))^2 = \sum_{t=0}^q m[2^t - 1] (2^t - 1 - p)^2 \quad (3)$$

式中 q ——小波系数量化位数

m ——统计小波系数取值频次的数组名, 即数组 $m[2^q]$ 统计小波系数低 q 位在 $[0, 2^q - 1]$ 范围内的取值频次

p ——图像重构操作中小波系数低 q 位的重构值

由式(1)可知, r_{MSE} 越小, R_{PSNR} 越大, 重构图像质量越高, 对式(3)右端求导并令导数为零, 求得令 r_{MSE} 分子取最小值的 p 值为

$$p = \frac{m[1] + 2m[2] + \dots + (2^q - 1)m[2^q - 1]}{m[0] + m[1] + \dots + m[2^q - 1]} \quad (4)$$

文献[10]描述的逐行小波变换后的各层系数分布规律不同, 根据小波系数低 q 位数值的概率分布确定量化值有利于提高图像重构质量。描述针对第 i 层小波系数子带利用式(4)计算量化值 p_i 的算法为:

```

初始化  $m[i][2^q] = \{0\}$ 
for( ; ; )
    for( $j=0; j < 2^q; j++$ )
        if(第  $i$  层变换系数)
            if(系数二进制数值的后  $q$  位 =  $j$ )
                 $m[i][j]++$ ;
    for( $i=1; i < 3; i++$ )
        sum1 = 0, sum2 = 0;
        for( $j=0; j < 2^q; i++$ )
            sum1 = sum1 +  $j * m[i][j]$ ;
            sum2 = sum2 +  $m[1][j]$ ;
         $p[i] = sum1 / sum2$ ;

```

其中, $p[i] (i=1, 2, 3)$ 为逐行小波系数重构时各层所采用的 p_i 值。图像小波系数量化可简化为将系数后 q 位置 0, 反量化时根据伪代码 1 计算得到的 p_i 重构小波系数。

2.2 比特平面二值自适应算术编码

2.2.1 小波系数特征分析

小波变换结果系数呈聚类现象。文献[10]的逐行小波 1 级变换中间变换向量 pic_zh1 及 pic_zh2 的单位是 2 个字节, 右移 6 位后各系数有效位数为 10 位, 范围介于 $-512 \sim 511$ 。以图 2 所示仔猪图像 1 级小波变换为例, 统计 $-512 \sim 511$ 之间各子带系

数数量,其统计结果如图 3 所示。

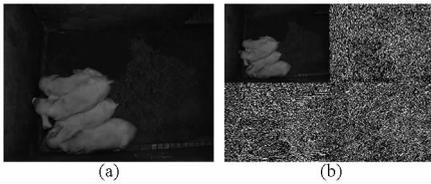


图 2 仔猪图像逐行小波变换

Fig. 2 Line based wavelet transform on a piglet picture

(a) 原始图 (b) 1 级逐行小波变换

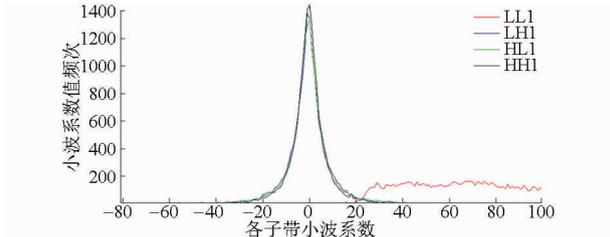


图 3 小波变换各子带系数统计

Fig. 3 Statistical diagram of wavelet transform coefficients in different subband

图 3 表明,子带 LH1、HL1、HH1 系数分布基本一致,在编码过程中可使用同一个二值模型。

2.2.2 二值自适应算术编码

算术编码是一种基于信源统计模型的编码方法,根据当前信源符号更新符号概率,选择相应的子区间并根据更新后的符号频率分割该子区间。每读入 1 个信源符号都重复该过程,直至信源所有符号全部编码结束。在最后 1 个符号对应的子区间随机选择 1 个小数,作为信源的编码结果。

对于仅有 2 个符号的二值信源 S ,利用 $[C(S), C(S) + A(S)]$ 表示其编码区间,二值自适应算术编码过程具体描述如下^[16]:

(1) 初始化。将信源 0、1 码个数 $n(0, S)$ 、 $n(1, S)$ 初始化为 1; 编码范围初始化为 $[0, 1)$, 利用 low、high 表示 0、1 中概率较小及较大的符号,即 $p(\text{low}, S) \leq p(\text{high}, S)$ 。

(2) 对 S 中的每个符号 x , 根据式(5)、(6)更新 x 的概率,根据式(7)、(8)将当前区间划分为长度与符号概率成正比的子区间。

$$p(0, S) = n(0, S) / n(S) \quad (5)$$

$$p(1, S) = n(1, S) / n(S) \quad (6)$$

$$\begin{cases} C(S, \text{low}) = C(S) \\ A(S, \text{low}) = A(S)p(\text{low}, S) \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} C(S, \text{high}) = C(S) + A(S, \text{low}) \\ A(S, \text{high}) = A(S)p(\text{high}, S) \end{cases} \quad (8)$$

其中, $n(S) = n(0, S) + n(1, S)$, (S, low) 和 (S, high) 表示二值串 S 后分别拼接符号 low 和 high 所形成的新二值数据段。

(3) 信源 S 中所有符号处理完毕后, 输出当前区间中的任一数字作为 S 的编码。

2.2.3 比特平面二值自适应算术编码

利用图 1 所示逐行小波变换方法处理 8 位的灰度图像所得小波系数需要 2B 存储, 而右移 6 位的操作^[10]使得各系数实际有效位数为 10 位, 其中, bit9 为符号位, bit8 ~ bit0 为数值位, 共构成 10 个比特平面, 记为 $BP_i (i = 0, 1, \dots, 9)$ 。在量化位数为 q 的前提下, 需要编码的小波系数位数为 $10 - q$, 对应比特平面为 $BP_9 \sim BP_q$ 。

逐行小波 n 级变换方法处理仔猪图像后将产生 $3n + 1$ 个子带, 如图 4 所示, 而每个子带都需要 $10 - q$ 个比特平面, 二值算术编码需要 $10 - q$ 个独立的二值概率模型, 模型数量过多, 编码操作过于复杂。

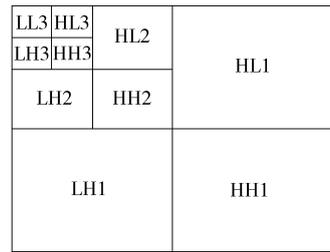


图 4 3 级小波变换的 10 个子带

Fig. 4 Ten subbands of the three wavelet transform

由 2.2.1 节分析可知, 子带 LH_i 、 HL_i 、 HH_i 系数分布特征一致, 可共用 1 个二值概率模型, 可将所需的独立模型数减少 2/3, 如图 5 所示, 此时编码复杂度将大幅降低。

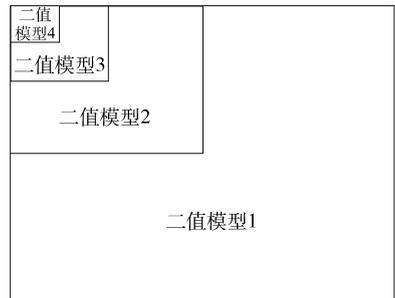


图 5 3 级小波变换的 4 个二值概率模型

Fig. 5 Four probabilistic models of the three wavelet transform

记图 4 中 LH_i – HH_i 的各行记为 $\text{pic-zhh-}i (i = 1, 2, 3)$, HL_i 中的行记为 $\text{pic-zhl-}i\text{-high} (i = 1, 2, 3)$; LL_3 中的行记为 pic-zhl-3-low 。

分析图 1、图 5 可知, $\text{pic-zhh-}i$ 与 $\text{pic-zhl-}i\text{-high}$ 同时生成且使用二值概率模型 $i (i = 1, 2)$, pic-zhh-3 、 pic-zhl-3-high 及 pic-zhl-3-low 同时生成, 但 pic-zhh-3 、 pic-zhl-3-high 使用二值概率模型 3, pic-zhl-3-low 使用二值概率模型 4。则将 $\text{pic-zhh-1} \parallel \text{pic-zhl-1-high}$ 、 $\text{pic-zhh-2} \parallel \text{pic-zhl-2-high}$ 、 $\text{pic-zhh-3} \parallel \text{pic-$

zhl-3-high 以及 pic-zhl-3-low 分别执行量化、编码即可完成逐行小波变换结果系数的二值自适应编码操作,其中,||表示二进制码的拼接。利用二值概率模型 1、2、3 的小波系数量化、编码流程如图 6 所示,利用二值概率模型 4 的小波系数量化、编码流程如图 7 所示。

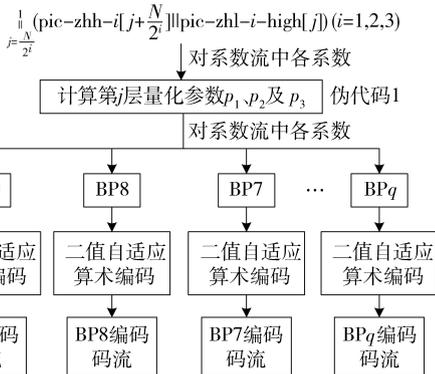


图 6 概率模型 1、2、3 小波系数量化与编码流程

Fig. 6 Quantization and encoding for the wavelet coefficients with probabilistic model 1, 2 and 3

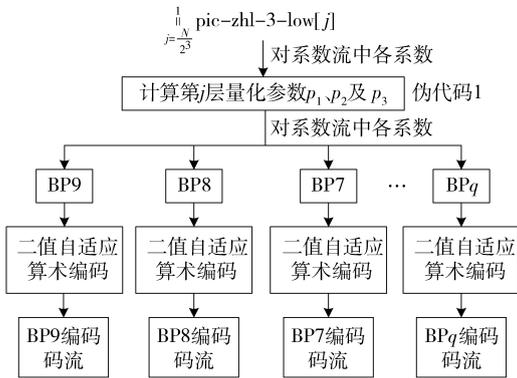


图 7 概率模型 4 小波系数量化与编码流程

Fig. 7 Quantization and encoding for the wavelet coefficients with probabilistic model 4

图 6、7 中 $\text{pic-zhh-}i-[j + N/2^i]$ 、 $\text{pic-zhl-}i\text{-high}[j]$ 及 $\text{pic-zhl-3-low}[j]$ 都是第 1 节逐行小波多级变换结果的各行,因此,图 6、7 所示小波系数量化、编码方法能够很好地与逐行小波多级变换方法耦合。为了方便算法的后续分析,记本节提出的编码方法为 BBAAC (Bit-plane binary adaptation arithmetic coding),记基于 BBAAC 的低内存小波图像压缩方法 LMIC (Low memory image compression),LMIC 包含 3 个模块:逐行小波多级变换^[10]、低内存开销量化以及 BBAAC 编码。

3 算法测试与开销分析

3.1 算法测试

将 1 幅 320 像素 × 240 像素的仔猪灰度图像存入 STM32 核心板 SD 卡中,原始图像如图 8a 所示。

在 Keil 4 环境中编写 LMIC 程序,烧写到 STM32,依次从 SD 卡中读取仔猪图像各行执行逐行小波多级变换、小波系数量化以及编码操作,将各位平面编码流存入 SD 卡。在 PC 机上针对 SD 卡上的码流执行解码、反量化以及小波逆变换。改变逐行小波图像压缩法程序中的量化位数 q 值,在 $q = 1, q = 2, q = 3, q = 4$ 以及 $q = 5$ 时,PC 上的恢复图像如图 8b ~ 8f 所示。

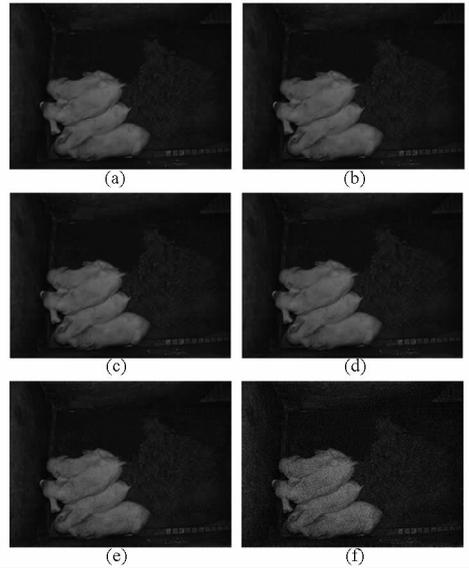


图 8 仔猪图像逐行小波压缩重构图

Fig. 8 Restoring image with different q

(a) 原始图 (b) $q = 1$ (c) $q = 2$
(d) $q = 3$ (e) $q = 4$ (f) $q = 5$

图 8 表明,随着量化位数的增多,仔猪图像逐渐变得模糊。在量化位数 q 取 1、2 和 3 的情况下,人眼几乎分辨不出恢复图与原图的差别,而量化位数 q 取 5 时,恢复图已经出现类似雪花的朦胧状。

引入压缩比概念表征压缩操作减少的图像数据量与原图像数据量大小的比值,分别从 SD 卡中读取图 8b ~ 8f 所示的不同量化位数 q 对应的压缩结果数据,则压缩比可表示为

$$r_{CR} = (1 - S_c/S_o) \times 100\% \quad (9)$$

式中 S_c ——压缩后的图像数据量

S_o ——原图像数据量

利用式(9)计算不同量化位数下的压缩比及对应的 R_{PSNR} ,如表 2 所示。

表 2 不同量化位数的压缩比和 R_{PSNR} 对比

Tab. 2 Compare of the compression ratio and R_{PSNR} with different quantization bits

q	$r_{CR}/\%$	R_{PSNR}
1	40.15	46.73
2	52.46	44.30
3	64.82	39.72
4	76.14	32.45
5	82.97	25.75

当 R_{PSNR} 不小于 40 时,人眼无法分辨原图与重构图之间的差异,表 2 表明,量化位数 q 取值为 3 时,LMIC 算法 R_{PSNR} 为 39.719 0,接近 40,此时的压缩比为 64.82%,在保证较好重构图像质量的前提下很好地对原图像进行了压缩,达到了预期效果。

3.2 算法性能分析

3.2.1 存储开销

分析算法伪代码可知,本文提出的量化方法内存开销为 $3 \times (2 \times 2^q + 4) + 2 \times 2$ 个字节,而 q 取值一般不超过 5。不同的 q 取值对应的内存开销对比如表 3 所示。

表 3 不同量化位数内存开销对比

Tab.3 Compare of the SRAM cost in different

quantization bits		B				
q	1	2	3	4	5	
内存开销	28	40	64	112	208	

二值自适应算术编码方法每建立 1 个二值概率模型需要:字符型中间变量、寄存器 A 和 C 各 1 个字节,记录 0,1 数量的长整型变量各 4 个字节,记录 0,1 概率的浮点型变量各 4 个字节,记录高、低概率中间变量 $p(\text{high}, S)$ 、 $p(\text{low}, S)$ 的浮点型数据各 4 个字节,代表高、低概率符号的字符型变量各 1 个字节。上述变量需要 29 个字节的内存开销,3 级小波变换情形下,二值自适应算术编码方法需要 4 个独立的二值概率模型,对小波变换的系数符号位独立编码需要 1 个模型,因此,总共需要 $29 \times (4 + 1) = 145$ B 内存。

根据第 2 节分析,BBAAC 算法将小波系数的每 1 个比特平面都用 1 个独立的二值概率模型进行算术编码,因此,系数数值位所需模型数是二值自适应算术编码的 k 倍,其中, $k = 9 - q$,系数符号位所需模型数与二值自适应算术编码相同,因此 BBAAC 算法内存开销为 $k \times 29 \times 4 + 29$ 。不同量化位数对应的 BBAAC 及 LMIC 算法内存开销如表 4 所示。

表 4 不同量化位数的内存开销

Tab.4 SRAM overhead in different quantization bits

		KB				
q	1	2	3	4	5	
BBAAC	0.957	0.841	0.725	0.609	0.493	
LMIC	5.945	5.841	5.749	5.681	5.661	

表 4 表明,本文提出的 BBAAC 算法内存开销低于 1 KB,与文献[10]低内存小波变换方法结合形成的 LMIC 图像压缩方法在 3 级小波变换且量化位数为 1 位时,其内存开销最大,但此时 LMIC 的内存开销仍低于 6 KB。

SPIHT 是对 EZW 的改进,JPEG2000 标准中采

用 EBCOT 作为小波系数编码方案,因此,本节仅对比基于 SPIHT 编码的图像压缩、JPEG2000 及 LMIC 的内存开销。SPIHT、JPEG2000 等基于小波变换的图像压缩算法,需要将整幅原始图像全部载入内存才能完成小波变换及系数编码工作,对于 320 像素 \times 240 像素的灰度图像,JPEG2000 及 SPIHT 算法的内存开销均达到 MB 数量级^[17],远远高于本文提出的 LMIC 图像压缩算法,因此 LMIC 算法符合图像传感器节点低内存开销的要求。

3.2.2 压缩效果对比

在 Matlab 2012b 环境中分别利用 JPEG、JPEG2000 及 SPIHT 压缩图 8a 所示的仔猪图像并重构,计算 R_{PSNR} 并与 LMIC 的 R_{PSNR} 对比如图 9 所示。JPEG、JPEG2000 压缩及重构程序从加拿大维多利亚大学电子与计算机工程系的 jasper 项目网站 (<http://www.ece.uvic.ca/~frodo/jasper>) 下载获得。基于 SPIHT 的图像压缩与重构源程序从伦斯勒理工学院图像处理研究中心网站 (<http://www.Cipr.Rpi.edu/research/SPIHT/spiht3.html>) 下载获得。4 种算法的 R_{PSNR} 对比如图 9 所示。

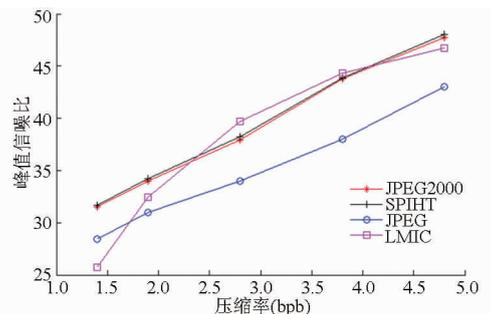


图 9 不同压缩算法压缩效果对比

Fig.9 Image quality of different compression algorithm

图 9 中采用压缩结果数据中表示原图像 1 个像素所需的比特数(bits per byte, bpb)表征图像压缩率,bpb 值越高,压缩率越低。观察图 9 发现,基于离散小波变换的 JPEG2000、SPIHT 算法重构图像质量优于 JPEG,LMIC 算法在 bpb 高于 1.7 时重构图像质量优于 JPEG。当 bpb 取值为 3.8、2.8 时,LMIC 的重构图像质量优于 JPEG2000 及 SPIHT,即当 LMIC 的量化位数为 2 位或 3 位时,LMIC 的压缩性能优于其他 2 种基于小波变换的图像压缩方法。但是,在压缩率的两端(bpb 取 4.8 或 1.4),JPEG2000、SPIHT 的图像压缩效果优于 LMIC。综合表 4 数据及图 9,LMIC 算法的量化位数取 3 时,其内存开销和重构图像质量取得了较好的平衡。

3.2.3 压缩时间开销

在 Matlab 2012b 环境中分别利用 JPEG2000、SPIHT 压缩图 8a 所示的仔猪图像,统计压缩时间并

与 LMIC 对比, SPIHT、JPEG2000 压缩程序来源与 3.2.2 节相同。

实验结果表明, 当 bpb 取 3.8 时, SPIHT、JPEG2000 及 LMIC 算法时间开销分别为 1.13 s、1.27 s 及 1.08 s, LMIC 的压缩时间略低于 JPEG2000 及 SPIHT, 这主要是因为 SPIHT、JPEG2000 在小波变换操作中涉及大量浮点运算操作, 而 LMIC 的逐行小波仅使用了定点运算^[10]。在 Keil 4.0 环境中编写 LMIC 程序压缩图 8a 所示的仔猪图像, 量化位数取 3 时, 算法仿真时间为 16.312 s。对于实时性要求不高的农业生产信息监测应用而言, 该时间开销合理, 适合于在 WMSN-agri 图像节点上应用。

4 结论

(1) 提出了一种图像小波系数低内存开销量化

及编码方法, 与逐行小波变换配合能够实现低内存开销的图像片上压缩功能。基于本文量化编码方法的图像压缩算法存储开销远低于 JPEG2000、SPIHT。图像压缩性能分析结果表明, 在量化位数取 3 位时, LMIC 算法的 bpb 压缩率达到 2.8, 时间开销为 16.312 s, R_{PSNR} 值为 39.719, 人眼分辨不出重构图像与原图之间的差异, 且重构图像质量优于同等压缩率条件下的 JPEG、JPEG2000 以及 SPIHT 算法。

(2) 在逐行小波变换的基础上, 本文提出的小波系数量化及编码方法能够以较低的存储开销、合理的时间开销在 WMSN-agri 单个图像节点上完成片上图像压缩工作。LMIC 并不具备 JPEG2000 标准中的渐进传输以及兴趣区域编码等特性, 因此, 一旦出现压缩图像传输异常中断, 则必须由图像节点重新传输压缩图像数据。

参 考 文 献

- 1 杨信廷, 吴滔, 孙传恒, 等. 基于 WMSN 的作物环境与长势远程监测系统[J]. 农业机械学报, 2013, 44(1): 167-173. Yang Xinting, Wu Tao, Sun Chuanheng, et al. Rmote monitoring system of crop environment and growing based on WMSN[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(1): 167-173. (in Chinese)
- 2 赵春江, 屈利华, 陈明, 等. 基于 ZigBee 的温室环境监测图像传感器节点设计[J]. 农业机械学报, 2012, 43(11): 192-196. Zhao Chunjiang, Qu Lihua, Chen Ming, et al. Design of ZigBee-based greenhouse environment monitoring image sensor node[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(11): 192-196. (in Chinese)
- 3 Ian F A, Tommaso M, Kaushik R C. A survey on wireless multimedia sensor networks[J]. International Journal of Computer and Telecommunications Networking, 2007, 51(4): 921-960.
- 4 熊迎军, 沈明霞, 孙玉文, 等. 农田图像采集与无线传输系统设计[J]. 农业机械学报, 2011, 42(3): 184-187. Xiong Yingjun, Shen Mingxia, Sun Yuwen, et al. Design on system of acquisition and wireless transmission for farmland image [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(3): 184-187. (in Chinese)
- 5 Lu Qin, Luo Wusheng, Wang Jidong, et al. Low-complexity and energy efficient image compression scheme for wireless sensor networks[J]. Computer Networks, 2008, 52(13): 2594-2603.
- 6 Wu H M, Abouzeid A A. Energy efficient distributed JPEG2000 image compression in multihop wireless networks [C] // Applications and Services in Wireless Networks, 2004: 152-160.
- 7 张龙妹, 陆伟, 史浩山. 一种适用于多跳 WMSNs 的分布式图像压缩算法[J]. 西北工业大学学报, 2010, 28(5): 695-699. Zhang Longmei, Lu Wei, Shi Haoshan. Proposing a distributed image compression algorithm suitable for multihop wireless multimedia sensor networks (WMSNs) [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2010, 28(5): 695-699. (in Chinese)
- 8 Tom Pearson. Hardware-based image processing for high-speed inspection of grains[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2009, 69(1): 12-18.
- 9 Johannes Karlsson. Image compression for wireless sensor networks[D]. Umea: Umea University, 2007.
- 10 陆明洲, 刘志强, 沈明霞, 等. WMSN 图像节点的低内存小波变换方法研究[J]. 农业机械学报, 2014, 45(4): 289-293. Lu Mingzhou, Liu Zhiqiang, Shen Mingxia, et al. Image wavelet transform method on low memory sensor nodes of WMSN[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(4): 289-293. (in Chinese)
- 11 Shapiro J. An embedded wavelet hierarchical image coder [C] // Proc. IEEE Int. Con. fcoust, Speech Singal Proc., 1992, 41(12): 657-660.
- 12 Said A. A new fast and efficient image codec based on set partitioning in hierarchical trees[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 1996, 6(3): 243-250.
- 13 Taubman D. High performance scalable image compression with EBCOT[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2000, 9(7): 1158-1170.
- 14 Li W P. Overview of fine granularity scalability in MPEG-4 video standard[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2001, 11(3): 301-317.
- 15 Rissanen J J. Generalized Kraft inequality and arithmetic coding[J]. IBM Journal of Research and Development, 1976, 20(3): 198-203.

Abstract: 3-D unsteady mathematical model of natural ventilation condition in Venlo type greenhouse was built up by CFD method. The boundary conditions were based on solar radiation, external air temperature, wind velocity and direction changing over time. The result shows that the inside temperature change had the same variation tendency with the outside temperature change during the whole simulation period. The mean temperature difference of the indoor and outdoor temperature was 3.09°C. RMSE of the simulated and measured value was 0.688°C. The maximum relative error and the average relative error was 8.9% and 2.8%, respectively. The CFD-based model could accurately represent the temporal and spatial variation of indoor temperature. When the outside wind speed changed from 0.81 m/s to 1.2 m/s and the wind direction changed from south-southwest to west, the local airspeed near the west windward entrance firstly increased and then decreased. The airflow speed in the east area was markedly increased. The average temperature of $x = 1.5$ m cross section at the entrance of ventilation and crop canopy dropped 1.87°C and 0.92°C in 180 s. Cooling effect of natural ventilation was remarkably affected by wind speed and direction.

Key words: Venlo greenhouse Temperature field 3-D unsteady CFD

(上接第 297 页)

16 钟建国, 吴冬梅. 基于二值自适应算术编码的图像无损压缩算法研究[J]. 陕西师范大学学报: 自然科学版, 2007, 35(1): 30-33.

Zhong Jianguo, Wu Dongmei. Research on image lossless compression method based on adaptive bit-level arithmetic coding[J]. Journal of Shanxi Normal University: Natural Science Edition, 2007, 35(1): 30-33. (in Chinese)

17 张雄明. 低内存需求的图像压缩关键技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2009.

Zhang Xiongming. Contributions to image compression with low-memory requirement[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2009. (in Chinese)

Image Compression Method with Low Memory Cost on Sensor Nodes of WMSN

Lu Mingzhou¹ Shen Mingxia¹ Liu Zhiqiang¹ Liu Longshen¹ Yang Xiaojing² Wang Yu³

(1. Jiangsu Province Engineering Lab for Modern Facility Agriculture Technology & Equipment, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China 2. Key Laboratory of Animal Physiology and Biochemistry, Ministry of Agriculture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China 3. School of Information Science and Engineering, South East University, Nanjing 211189, China)

Abstract: Based on bit plane and adaptive binary arithmetic coding, a wavelet coefficients coding scheme which could match the line-based wavelet transform efficiently was proposed. The MCU of the image sensor node read image data from FIFO line by line, executed multi-level wavelet transform, determined the quantization value according to the probability distribution of the wavelet coefficients in different level, performed adaptive binary arithmetic coding based on four binary probabilistic model and realized image compression based on wavelet transform with a low cost of SRAM. The image compression method was applied to handle a 320 pixels \times 240 pixels gray image of piglets. Experimental results show that the SRAM cost, time cost and the PSNR was 5.749 KB, 16.312 s and 39.72 dB respectively when the quantization value was set to three. This study established the foundation for agricultural image transmission over the low bandwidth WMSN efficiently.

Key words: Multimedia sensor network Image compression Low memory coefficient coding Bit plane Binary arithmetic encoding