

# 嵌入式零树小波编码的细胞图像无损压缩研究

孙万蓉<sup>1,2</sup>, 钟政辉<sup>2</sup>, 俞卞章<sup>1</sup>, 张小京<sup>2</sup>

(1. 西北工业大学 电子信息学院, 陕西 西安 710072;

2. 西安电子科技大学 电子工程学院, 陕西 西安 710071)

**摘要:** 探讨了各种整数小波变换应用于骨髓细胞图像无损压缩时的能量特征分布和子带零系数比例分布等, 来选取适合骨髓细胞图像的变换形式. 实验结果表明, CDF(4, 2) 整数小波变换对骨髓细胞图像具有较优良的性能. 在使用嵌入式零树小波编码算法进行变换系数的编码时, 基于骨髓细胞图像的特点, 提出了新的阈值选取方案. 实验结果表明, 新的选取方案能够有效地增加零树的数目, 从而提高骨髓细胞图像的压缩效率.

**关键词:** 整数小波变换; 零树编码; 图像压缩; 骨髓细胞图像; 量化阈值

中图分类号: TN919.81 文献标识码: A 文章编号: 1001-240X(2006)02-0327-06

## Study of cell images lossless compression based on the EZW algorithm

SUN Wan-rong<sup>1,2</sup>, ZHONG Zheng-hui<sup>2</sup>, YU Bian-zhang<sup>1</sup>, ZHANG Xiao-jing<sup>2</sup>

(1. School of Electronics Information, Northwestern Polytechnic Univ., Xi'an 710072, China; 2. School of Electronics Engineering, Xidian Univ., Xi'an 710071, China)

**Abstract:** Several integer wavelet transforms are compared on marrow cell image energy distribution and their percentage of zero coefficients in every subband for higher performance of marrow cell image lossless compression. CDF(4, 2) are found to be particularly good. A new method for threshold quantization is applied to EZW coding. Experimental results show that this approach can increase the number of zerotrees and improve the performance of compression.

**Key Words:** integer wavelet transform; zerotree coding; image compression; marrow cell images; quantization threshold

随着现代医学影像技术的发展, 数字化成像设备在临床医疗诊断中扮演着越来越重要的角色. 医学图像数字化步伐的加快使得影像存储与传输系统(PACS)的发展越来越引人注目. 如何解决 PACS 系统中海量的医学图像数据与有限的存储空间的问题显得至关重要. 解决此问题的关键在于如何实现医学图像的有效压缩<sup>[1]</sup>.

早期的图像压缩技术主要基于 Shannon 信息论的熵编码技术, 如 Huffman 编码、RCL 编码、算术编码、LZ 编码等. 随着图像压缩技术的发展, 开始引进了新的数学工具和理论, 如小波理论、分形理论等. 而其中由于整数小波变换(IWT)<sup>[2~4]</sup>的实现形式是从整数到整数的变换, 因而成为无损压缩研究的热点. 对整数小波变换后的系数采用嵌入式零树小波编码(EZW)算法<sup>[5]</sup>或者 SPIHT 算法<sup>[6]</sup>及其改进形式进行编码, 能达到图像压缩的目的.

笔者探讨了不同形式的整数小波变换应用于骨髓细胞图像无损压缩的情况. 通过比较这些整数小波形式应用于骨髓细胞图像后变换系数的熵值、能量特征、零系数特征等, 选取最适合骨髓细胞图像特点的变换形式. 另外, 通过对 EZW 算法的研究, 结合整数小波变换和骨髓细胞图像的特点, 提出了一种新的阈值选取方案, 有效增加了零树的数目, 从而提高了骨髓细胞图像的压缩效率.

## 1 整数小波变换

一般情况下,基于提升方案的整数小波变换的过程可分解为 3 个阶段:(1)分裂过程,也称为 Lazy 小波变换过程。在此过程中将待分解信号分解为奇数序列 odd 和偶数序列 even。(2)预测过程,也称为对偶提升过程。在此过程中使用算子 P 和偶数序列对奇数序列进行预测,并用预测误差 odd-P(even)作为小波系数  $d$ 。(3)更新过程,也称为原始提升过程。在此过程中使用算子 U 和小波系数  $d$  对偶数序列进行更新,以使更新后的偶数序列保持与待分解信号保持一些相同的特性,如均值等统计信息。

设原始信号的逼近系数记为  $s_k^{j[7]}$ ,其中  $j$  代表分解的层次,  $k$  代表信号的下标。当分解层次为 0 时,  $s_k^0$  代表原始信号。将原始信号经小波分解后的小波系数记为  $d_k^j$ 。几种整数小波变换形式如下:

$$(1) \text{ S 变换 } d_k^{j+1} = s_{2k+1}^j - s_{2k}^j, s_k^{j+1} = s_{2k}^j + d_k^{j+1}/2 \downarrow$$

$$(2) \text{ TS 变换 } d_k^{(1)j+1} = s_{2k+1}^j - s_{2k}^j, s_k^{j+1} = s_{2k}^j + d_k^{(1)j+1}/2 \downarrow, d_k^{j+1} = d_k^{(1)j+1} + (s_{k-1}^{j+1} - s_{k+1}^{j+1} + 2)/4 \downarrow$$

$$(3) \text{ S + P 变换 } d_k^{(1)j+1} = s_{2k+1}^j - s_{2k}^j, s_k^{j+1} = s_{2k}^j + d_k^{(1)j+1}/2 \downarrow,$$

$$d_k^{j+1} = d_k^{(1)j+1} + (s_{k-1}^{j+1} - s_{k+1}^{j+1})/4 + 3 \times (s_{k-1}^{j+1} - s_{k+1}^{j+1})/8 + d_{k+1}^{(1)j+1}/4 + 1/2 \downarrow$$

$$(4) \text{ 5/3(2 2)双正交小波变换 } d_k^{j+1} = s_{2k+1}^j - (s_{2k}^j + s_{2k+2}^j + 1)/2 \downarrow, s_k^{j+1} = s_{2k}^j + (d_{k-1}^{j+1} + d_{k+1}^{j+1} + 2)/4 \downarrow$$

$$(5) \text{ CDF(4 2)变换 } d_k^{j+1} = s_{2k+1}^j - 9 \times (s_{2k}^j + s_{2k+1}^j)/16 - (s_{2k-2}^j + s_{2k+4}^j)/16 + 1/2 \downarrow,$$

$$s_k^{j+1} = s_{2k}^j + (d_{k-1}^{j+1} + d_k^{j+1} + 2)/4 \downarrow$$

$$(6) \text{ CDF(2 4)变换 } d_k^{j+1} = s_{2k+1}^j - (s_{2k}^j + s_{2k+2}^j + 1)/2 \downarrow,$$

$$s_k^{j+1} = s_{2k}^j + 19 \times (d_{k-1}^{j+1} + d_k^{j+1})/64 - 3 \times (d_{k-2}^{j+1} + d_{k-1}^{j+1})/64 + 1/2 \downarrow$$

公式中,符号“ $\downarrow$ ”代表取整过程。带上标(1)的数据为计算过程的中间结果。由正变换形式可以很容易地推出其反变换形式。以 S 小波变换为例,其反变换形式为  $s_{2k}^j = s_k^{j+1} - d_k^{j+1}/2 \downarrow, s_{2k+1}^j = d_k^{j+1} + s_{2k}^j$ 。正变换形式和反变换形式只有符号上的差别。

## 2 EZW 编码算法

二维图像经多次小波分解后,原图像变换成一个低频带  $LL_n$  和  $3n$  个高频带部分  $HL_j, LH_j$  和  $HH_j, j = n, \dots, 1, n$  为分解的级数。分解后的系数在不同分辨率之间具有自相似性,这是零树编码算法提出的理论基础。较低频子带中的任何系数均在较高频子带内存在 4 个子系数,而且系数的绝对值从父系数到子系数有下降的趋势。父系数和子系数之间构成四叉树的关系。

对于给定的一个阈值,如果从某个系数起,它的后代在给定的阈值下全为零,并且该系数的父节点给定的阈值下非零,则该系数称为零树根,它和它的所有后代节点构成一棵零树。对所有子带进行扫描时,可分辨 4 类不同的系数:零树根(用  $t$  表示)、正系数(用  $p$  表示,代表大于阈值的正系数)、负系数(用  $n$  表示,代表绝对值大于阈值的负系数)和孤立零系数(用  $z$  表示,代表自身绝对值小于阈值但其后代系数中有绝对值大于阈值的系数即重要系数存在的系数)。

EZW 算法首先根据公式  $T_0 = 2^{\log_2 k_j}$  求得初始阈值,其中  $T_0$  为初始阈值,  $k_j$  为系数的最大绝对值。运用  $T_0$ ,对所有系数进行主扫描。完成主扫描后,当前阈值减半,进行从扫描。主扫描和从扫描两个过程交替进行,最终编码器可在 3 种情况下终止:一是达到了目标量化等级;二是达到了目标码率;三是达到最小的阈值 1,即达到了无损编码<sup>[8]</sup>。

## 3 骨髓细胞图像特点及整数小波变换性能分析

用于整数小波变换性能分析的 3 幅骨髓细胞显微图像如图 1 所示。表 1 给出了使用 5/3(2 2)双正交小波变换对 3 幅骨髓细胞图像与 Lena, Mandrill 和 GoldHill 图像进行两层整数小波变换,并对变换结果进行子

带熵值分析得出的实验数据. 熵值的计算公式为  $H = - \sum_{k,l} P(f_{k,l}) \log_2 P(f_{k,l})$ .



图 1 骨髓细胞显微图像

表 1 普通图像与骨髓细胞图像子带熵值分析对比

图像	原图熵	LL2	LH2	HL2	HH2	LH1	HL1	HH1
Lena	7.4455	7.5211	4.4958	5.0172	4.9644	3.9902	4.3508	4.1172
Mandrill	7.3579	7.2869	6.6366	6.2533	6.7715	6.3145	5.6918	5.8974
GoldHill	7.4778	7.4930	5.5159	5.2096	5.2479	4.7130	4.7770	4.4894
图 1(a)	5.9510	5.9970	3.2777	3.3771	3.3378	2.5975	2.9613	2.9081
图 1(b)	5.7278	6.2510	4.4096	4.7148	4.4038	3.1864	3.6059	2.9950
图 1(c)	6.0718	6.6320	4.5016	4.8926	4.3926	3.2627	3.6385	3.1239

表 2 骨髓细胞图像经过两层整数小波变换后的能量特征分析(单位:百分比)

图像名称	图 1(a)(256 × 256 × 8)						
变换	LL2	LH2	HL2	HH2	LH1	HL1	HH1
S	99.65	0.04	0.04	0.01	0.06	0.12	0.08
TS	99.77	0.01	0.01	0.01	0.03	0.09	0.09
S+P	99.50	0.06	0.07	0.02	0.10	0.17	0.08
5/3(2,2)	99.80	0.02	0.02	0.01	0.04	0.07	0.04
CDF(4,2)	99.90	0.01	0.02	0.00	0.02	0.04	0.01
CDF(2,4)	99.76	0.03	0.04	0.01	0.04	0.08	0.04

  

图像名称	图 1(b)(256 × 256 × 8)						
变换	LL2	LH2	HL2	HH2	LH1	HL1	HH1
S	98.17	0.25	0.29	0.16	0.37	0.56	0.20
TS	99.21	0.09	0.17	0.10	0.09	0.22	0.12
S+P	97.55	0.34	0.39	0.18	0.58	0.71	0.24
5/3(2,2)	98.99	0.16	0.29	0.13	0.12	0.26	0.05
CDF(4,2)	99.48	0.09	0.12	0.02	0.12	0.16	0.02
CDF(2,4)	99.04	0.15	0.30	0.11	0.10	0.25	0.05

  

图像名称	图 1(c)(256 × 256 × 8)						
变换	LL2	LH2	HL2	HH2	LH1	HL1	HH1
S	98.24	0.24	0.30	0.17	0.36	0.50	0.19
TS	99.15	0.09	0.17	0.09	0.11	0.25	0.25
S+P	97.38	0.33	0.47	0.16	0.53	0.87	0.25
5/3(2,2)	99.11	0.13	0.27	0.10	0.10	0.24	0.05
CDF(4,2)	99.47	0.08	0.13	0.02	0.10	0.19	0.02
CDF(2,4)	98.95	0.17	0.29	0.11	0.15	0.26	0.07

表 3 骨髓细胞图像经过两层整数小波变换后的各子带零系数百分比(单位:百分比)

图像名称	图 1(a)(256 × 256 × 8)						
变换	LL2	LH2	HL2	HH2	LH1	HL1	HH1
S	0.00	24.49	25.42	24.17	26.07	25.12	21.70
TS	0.00	31.64	33.64	25.02	32.62	29.51	20.92
S+P	0.00	20.85	21.12	20.43	23.58	22.65	20.67
5/3(2,2)	0.00	24.00	26.68	21.41	32.93	29.25	27.53
CDF(4,2)	0.00	27.93	27.81	42.65	33.86	37.25	48.90
CDF(2,4)	0.00	24.58	26.27	22.39	33.38	28.42	27.53

  

图像名称	图 1(b)(256 × 256 × 8)						
变换	LL2	LH2	HL2	HH2	LH1	HL1	HH1
S	0.00	23.26	25.22	23.83	30.87	31.36	30.67
TS	0.00	22.83	23.22	20.19	33.95	31.04	29.41
S+P	0.00	19.60	20.12	17.09	27.15	27.39	26.65
5/3(2,2)	0.00	21.61	20.73	23.41	34.16	32.56	34.99
CDF(4,2)	0.00	23.02	22.95	31.67	34.69	33.52	45.62
CDF(2,4)	0.00	21.97	19.63	23.39	34.14	32.68	34.99

  

图像名称	图 1(c)(256 × 256 × 8)						
变换	LL2	LH2	HL2	HH2	LH1	HL1	HH1
S	0.00	18.29	20.34	18.58	23.44	24.01	22.08
TS	0.00	21.19	19.78	17.65	28.09	25.15	22.84
S+P	0.00	14.87	16.50	14.97	20.61	21.67	20.67
5/3(2,2)	0.00	18.19	18.53	19.78	28.34	24.46	27.98
CDF(4,2)	0.00	21.04	20.36	29.74	29.85	27.33	41.89
CDF(2,4)	0.00	17.68	16.60	18.63	28.30	25.47	27.98

分析实验结果可知,骨髓细胞图像具有如下特点:(1)相同或相近灰度级连续像素较多;(2)细胞图像原始

熵值低于自然图像 (3)变换后各子带的熵值均比自然图像对应子带熵值低 (4)整数小波变换系数不同分辨率的子带其熵值下降的速度比自然图像下降的速度快.

为寻找合适的整数小波变换形式,表 2 给出了图 1 所示的 3 幅骨髓细胞图像经过 6 种不同的整数小波,经两层变换后各子带的能量与整幅图像的能量百分比.该百分比的计算公式为

$$E_{\text{Subband}}/E_{\text{All}} = \sum_{k_1, l_1} f_{k_1, l_1}^2 / \left( \sum_{k, l} f_{k, l}^2 \right) ,$$

其中  $k_1, l_1$  为变换后对应子带中像素的下标  $k, l$  为变换后的整幅图像(含对应子带)中的像素的下标  $E_{\text{Subband}}$  表示子带的能量  $E_{\text{All}}$  表示整幅图像的能量.

分析表 2 可知,在此 6 种整数小波变换之中,CDF(4,2)小波变换在应用于 3 幅骨髓细胞图像的时候,LL2 子带的能量比例在整幅图像中均具有最大比例,与此同时 S+P 变换后 LL2 子带的能量比例最低.从能量集中的角度,CDF(4,2)变换比较适合于骨髓细胞图像的无损压缩.

除了能量特征分析之外,零系数比例分析也是衡量小波变换质量的重要手段.子带零系数分析通过统计不同子带内零系数所占的比例,分析预测过程的准确程度.表 3 给出了图 1 所示的 3 幅骨髓细胞图像经过 6 种不同的整数小波变换后各子带的零系数百分比.

分析表 3 可知 (1)第一层分解的 3 个高频子带中 CDF(4,2)的零系数均占有最高的比例 (2)第二层分解的 HH2 子带中 CDF(4,2)的零系数占据最高比例,另外两个子带则相当或者优于其余变换形式.与此同时,对 S+P 变换后各子带的零系数比例较低.从零树编码的原理分析,零系数比例越大越有利于编码.这个结论与前面的能量特征分析的结论相吻合.

### 4 适合骨髓细胞图像整数小波变换编码的零树编码改进方案

EZW 算法的提出是基于传统小波变换的,它充分利用了不同子带系数间的相关性,是一种高效的算法.对于零树编码的无损压缩来说,提高压缩效率的关键在于尽可能的增加零树的数量<sup>[9]</sup>.但由于文中所提及的具体应用,有如下两点原因将导致零树的数量减少:

- (1) 由于整数小波变换采用提升格式使各子带系数幅值的动态范围低于传统小波变换的子带系数幅值动态范围,在较高阈值的情况下仍然存在着较多的重要系数,导致零树数目的减少,不利于 EZW 算法的应用.
- (2) 当针对骨髓细胞图像进行图像压缩应用研究时,由于骨髓细胞图像前述子带熵值分析的 4 个特点,其子带系数幅值动态范围将进一步缩小(参见表 4 的实验结果).

如果结合零树小波编码算法的优越性能与整数小波变换和骨髓细胞图像的特点是问题得以解决的关键.针对这一问题,文献 [10, 11]中提出了“基于整数平方阈值”的零树算法对传统的 EZW 算法加以修正,在基于自然图像的图像压缩应用研究中取得了较好的效果,但是该阈值选取方案应用于骨髓细胞图像时效果不突出.“整数平方”量化阈值选取方案对“2 的整数幂”量化阈值的选取方案的主要改进之处在于“整数平方”量化阈值选取方案对高于 32 的阈值作了进一步的细分,从而增加了零树的数目.因此,结合骨髓细胞图像的特点,笔者提出在“整数平方”量化阈值选取方案的基础上,对量化阈值的量化间隔进行更进一步的细化以增加零树的数量.细化量化间隔的简便方法是对整数平方的幂值进行修正,这里采用的取法为  $n^{19/10}$ ,其中符号“ $\cdot_j$ ”代表取整过程.图 2 所示是采用新的阈值选取方案的示意图.

采用新阈值选取方案后,具体的编码算法如下:

- (1) 建立阈值数组  $\mathcal{A}(n)$ ,令  $\mathcal{A}(n) = \text{floor}[\text{pow}(n, 1.9)]$  找出小波变换系数幅度最大值  $f_{\text{max}}$ . 将其与数组  $\mathcal{A}(n)$  作比较,找出满足  $f_{\text{max}} < \mathcal{A}(n)$  的最大  $n$  值记为  $n_0$ ,令  $T_0 = \mathcal{A}(n_0 - 1)$ ;

79-94	65-78	52-64	40-51	30-39	21-29	14-20	8-13	4-7	1-3
269-295	243-268	218-242	194-217	172-193	151-171	131-150	112-130	95-111	

图 2 新的量化阈值选取方案

- (2) 按照 EZW 算法进行当前阈值下的主扫描过程与从扫描过程；
- (3) 从阈值数组中寻找下一个阈值数据, 根据此阈值数据重复第(2)步, 直到阈值为 1；
- (4) 仅对高频子带进行编码, 而低频子带采用 DPCM 编码<sup>[12]</sup>。

根据该算法, 使用 CDF(4, 2) 对图 1 中的 3 幅图像进行 6 层整数小波变换, 并统计“整数平方”和文中阈值取法在不同阈值范围的高频子带重要系数数目, 得到表 4, 表 5 的实验结果。其中所有图像均为 256 × 256 × 8 的灰度图像, Camera 是作为对比用的自然图像。

表 4 采用“整数平方”阈值选取方案的各子带重要系数数目

$n$	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
$n^2$	—	82-100	65-81	50-64	37-49	26-36	17-25	10-16	5-9	2-4	0-1
图 1(a)	—	—	—	—	—	—	12	83	418	2583	17 129
图 1(b)	—	—	—	2	23	88	306	933	2903	9809	27 753
图 1(c)	—	—	—	1	13	77	232	723	2407	8338	27 500
Camera	—	7	62	243	626	1 176	2 050	3 820	7 917	15 185	29 739

表 5 采用文中阈值选取方案的各子带重要系数数目

$n$	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
$n^{19/10}$	89-95	66-79	53-65	41-52	31-40	22-30	15-21	9-14	5-8	2-4	0-1
图 1(a)	—	—	—	—	—	2	33	130	556	2583	17 129
图 1(b)	—	—	1	12	65	173	479	1 240	3 530	9 809	27 753
图 1(c)	—	—	1	9	55	145	359	1 001	2 953	8 338	27 500
Camera	15	72	227	525	989	1 559	2 604	4 574	8 934	15 185	29 739

分析表 4, 表 5 的各子带重要系数数目, 结合零树编码的基本理论, 可得出如下结论:

(1) 采用文中阈值选取方案后, 由于阈值区间的细化, 高阈值部分重要系数的数量在“整数平方”算法的基础上进一步减少(如图 1(a)中从 12 减到 2、从 83 减到 33, 图 1(b)中从 2 减到 1、从 23 减到 12, 图 1(c)中从 13 减到 9 等等)。在每一级中, 重要系数的取值更加接近于原系数值, 从而最大限度地增加了零树的数目, 提高了编码效率;

(2) 采用文中阈值选取方案后, 由于较高阈值下重要系数较少, 因而在有很多系数量化误差较大的情况下可降低总的相对误差;

(3) 采用文中阈值选取方案后, 骨髓细胞图像的小波系数在每个阈值区间内近似呈线性分布, 每个量化阈值区间内的零树数量更趋于合理。对于渐进式传输而言, 可避免图像解码质量出现大幅度的波动。

该算法的优越性在于既继承了整数平方量化阈值的优越性, 又结合了骨髓细胞图像的特点, 使小波系数在不同阈值区间的分布更加合理, 因而可提高骨髓细胞图像压缩的编码效率。

## 5 结束语

为选取更适合于骨髓细胞图像的整数小波变换形式, 探讨了各种形式的整数小波变换应用于骨髓细胞图像无损压缩时的能量特征分布和子带零系数比例分布。实验结果表明, CDF(4, 2) 整数小波变换对骨髓细胞图像具有较优良的性能。在使用 EZW 算法进行变换系数的编码时, 基于骨髓细胞图像的特点, 提出了新的阈值选取方案。实验结果表明, 新的选取方案能够有效地增加零树的数目, 从而提高骨髓细胞图像的编码效率。

基于零树思想的 EZW 算法在其阈值的选取、如何充分地利用小波变换之后的系数分布特性等方面仍需进行深入的研究。

### 参考文献:

[1] 冯林, 姚明. 一种基于医学序列图像的“有损-无损”压缩方案[J]. 北京生物医学工程, 2004, 23(4): 241-245.  
 [2] Li Ping, Xu Luping, Xie Xuemei. A New Part-lossless Image Compression Algorithm Based on Regions of Interest[J]. Journal

of Xidian University ,2004 ,31( 4 ) :593-596.

- [ 3 ] Sweldens W. The Lifting Scheme : a Construction of Second Generation Wavelets[ J ]. SIAM Journal on Mathematical Analysis , 1998 ,29( 2 ) :511-546.
- [ 4 ] Sweldens W. Wavelets and the Lifting Scheme : a 5 Minute Tour[ J ]. Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik , 1996 ,76( suppl. 2 ) :41-44.
- [ 5 ] Shapiro J M. Embedded Image Coding Using Zerotrees of Wavelet Coefficients[ J ]. IEEE Trans on Signal Processing , 1993 ,41( 12 ) :3445-3462.
- [ 6 ] Said A. A New , Fast , and Efficient Image Codec Based on Set Partitioning in Hierarchical Trees[ J ]. IEEE Trans on Circuits and Systems for Video Technology , 1996 ,6( 3 ) :243-250.
- [ 7 ] Stollnitz E J , DeRose T D , Salesin D H. Wavelets for Computer Graphics : a Primer , Part I[ J ]. IEEE Computer Graphics and Applications , 1995 ,15( 3 ) :76-84.
- [ 8 ] 胡 栋. 静止图像编码的基本思想与国际标准[ M ]. 北京 :北京邮电大学出版社 ,2003.
- [ 9 ] 毛立强. 基于小波变换的图像压缩编码研究[ D ]. 西安 :西安电子科技大学 ,2004. 27-50.
- [ 10 ] 张立保 ,王 珂. 零树框架下整数小波图像编码的改进[ J ]. 电路与系统学报 ,2003 ,8( 3 ) :66-70.
- [ 11 ] 张立保 ,王 珂. 一种基于整数小波变换的图像编码算法[ J ]. 软件学报 ,2003 ,14( 8 ) :1433-1438.
- [ 12 ] 唐良瑞 ,蔡安妮 ,孙景馨. 一种基于整数小波变换的图像无损压缩方法[ J ]. 计算机工程与应用 ,2002 ,( 23 ) :54-56.

( 编辑 : 齐淑娟 )

( 上接第 267 页 ) 可被清空的严格极小信标. 更进一步地 , 通过检查控制库所的冗余性 , 提出了一个新的有效的死锁预防策略. 由于从控制库所中移去了一些冗余控制库所 , 减少了对控制对象的限制 , 从而能获得一个结构更为简单的活性监控器. 进一步的工作是研究如何优化地移去冗余地控制库所. 例如 , 移去不同的冗余库所 , 会导致具有不同数目的可达状态的活性控制器.

#### 参考文献 :

- [ 1 ] Chu F , Xie X L. Deadlock Analysis of Petri Nets Using Siphons and Mathematical Programming[ J ]. IEEE Trans on Robot Automat , 1997 ,13( 6 ) :793-804.
- [ 2 ] Wysk R A , Yang N S , Joshi S. Detection of Deadlocks in Flexible Manufacturing Systems[ J ]. IEEE Trans on Robot Automat , 1991 ,7( 6 ) :853-859.
- [ 3 ] Banaszak Z , Krogh B H. Deadlock Avoidance in Flexible Manufacturing Systems with Concurrently Competing Process Flows [ J ]. IEEE Trans on Robot Automat , 1990 ,6( 6 ) :724-734.
- [ 4 ] Ezpeleta J , Colom J M , Martinez J. A Petri Net Based Deadlock Prevention Policy for Flexible Manufacturing Systems[ J ]. IEEE Trans on Robot Automat , 1995 ,11( 2 ) :173-184.
- [ 5 ] Huang Y S , Jeng M D , Xie X L , et al. A Deadlock Prevention Policy for Flexible Manufacturing Systems Using Siphons[ A ]. Proc IEEE Int Conf Robot Autom[ C ]. Piscataway : IEEE Press , 2001. 541-546.
- [ 6 ] Li Z W , Zhou M C. Elementary Siphons of Petri Nets and Their Application to Deadlock Prevention Inflexible Manufacturing Systems[ J ]. IEEE Trans Syst , Man , Cybern , A , 2004 ,34( 1 ) :38-51.
- [ 7 ] Barkaoui K , Pradat-peyre J F. On Liveness and Controlled Siphons in Petri Nets[ A ]. Proc Int Conf Application and Theory of Petri Nets[ C ]. Osaka : Springer-Verlag , 1996. 57-72.
- [ 8 ] Abdallah B , ElMaraghy H A. Deadlock Prevention and Avoidance in FMS : a Petri Net Based Approach[ J ]. Int J Adv Manuf Tech , 1998 ,14( 10 ) :704-715.
- [ 9 ] Li Z W , Liu H. A Method for Deciding Deadlock Structures Caused by Parallel-shared Resources[ J ]. Journal of Xidian University , 1999 ,26( 1 ) :18-21.
- [ 10 ] Li Z W , Zhou M C. Elementary Siphons of Petri Nets for Effective Deadlock Control in FMS[ A ]. Deadlock Resolution in Computer-Integrated Systems[ C ]. New York : Marcel-Dekker Co , 2005.

( 编辑 : 齐淑娟 )

