

文章编号 1004-924X(2008)07-1323-07

ROI 的海洋监视卫星遥感图像压缩算法

隋玉萍^{1,2}, 何 昕¹, 魏仲慧¹

- (1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要: 针对海洋监视卫星遥感图像的特点, 提出了一种基于感兴趣区域(ROI)的自适应海洋遥感图像近无损压缩算法。对图像进行了形态 Harr 小波最大提升后, 在一个分辨率低的高频子带中利用阈值和八邻域连通分析方法检测出目标, 使用外接矩形与环面的交集来描述 ROI, 其他分辨率高频子带的 ROI 通过 Mosaic 放大得到。高频子带中的 ROI 采用 Rice 无损熵编码方法, 非 ROI 进行比特平面编码。低频子带采用 DPCM 和 Rice 结合的无损编码方法。实验结果表明, 该算法能有效地划分 ROI, 且没有明显的 ROI 分割痕迹。在中低比特率时, 本文算法的峰值信噪比(PSNR)比 JPEG2000 的高 2~5 dB, 在高比特率时, 两者的 PSNR 均在 45 dB 以上。本文算法计算复杂度低, 易于硬件实现, 且具有自适应性和数据包独立的优点, 适用于海洋监视卫星遥感图像的近无损压缩。

关键词: 海洋监视卫星; 遥感图像; 形态小波; 感兴趣区域; 图像压缩

中图分类号: TP751 文献标识码: A

A compression algorithm of remote sensing image based on ROI for ocean surveillance satellite

SUI Yu-ping^{1,2}, HE Xin¹, WEI Zhong-hui¹

- (1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*
2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

Abstract: According to the characteristics of the remote sensing images for ocean surveillance satellite, an adaptive near-lossless compression algorithm based on ROI (Regions of Interest) is proposed. After maximum lifting of morphological Harr wavelet, the objects are detected by threshold method and connectivity analysis of eight adjacent regions. The ROI of high-frequency sub-bands is depicted by the intersection of enclosing rectangle and an annulus in the lowest-resolution and gained by mosaic magnification in other resolution levels. In high-frequency sub-bands, Rice lossless entropy encoder is used for ROI, and bit plane encoder for background region, while DPCM and Rice for low-frequency sub-band. The experimental results show that the algorithm can segmentalize the ROI effectively without any visible segmentation trace. The PSNR (Peak Signal Noise Ratio) of proposed algorithm is 2~5 dB higher than that of JPEG2000 at low and middle bit rate, and both are higher than 45 dB at

收稿日期: 2007-10-29; 修订日期: 2008-01-08.

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目

high bit rate. The algorithm has the advantages of low complexity, higher adaptive ability and independent datum packet and is easy to be implemented in hardware. Moreover, the algorithm can adapt to near-lossless compression for ocean surveillance satellite image.

Key words: ocean surveillance satellite; remote sensing image; morphological wavelet; Region of Interest(ROI); image compression

1 引言

海洋监视卫星主要用于探测和监视海上舰船的活动,由于目标通常是运动的,因此卫星必须实时传输遥感图像数据才能起到战术性的作用。随着探测器的迅速发展,遥感图像的分辨率越来越高,图像的数据量随之猛增。为了解决传输带宽与数据量之间的矛盾,有必要对遥感图像进行压缩。海洋监视卫星遥感图像中的舰船目标包含了非常重要的信息,因此压缩的过程中应尽可能地保留目标的全部信息。无损压缩可以实现重构图像无失真,但其压缩比一般比较低^[1]。从海洋监视卫星上得到的遥感图像一般是由舰船目标和简单的海洋背景构成的,而用户只对目标感兴趣,因此可以采用基于感兴趣区域(Regions Of Interest, ROI)的近无损压缩方法,即对 ROI 进行无损压缩,对背景区域进行大压缩比的有损压缩。在星上实现近无损压缩技术,需要考虑以下几点^[2]:

- (1) 可以处理帧格式和推扫格式的数据;
- (2) 数据率或图像质量可调(直到无损模式);
- (3) 可以处理比较大的量化范围(输入像素 4 ~16 bit);
- (4) 实时处理;
- (5) 最小程度的地面干预;
- (6) 分组传输,限制误差扩散。

静态图像压缩标准 JPEG2000 是基于感兴趣区域编码的,具有很好的压缩性能。但是该算法复杂度很高,因此很难实现实时处理,而且 JPEG2000 中的感兴趣区域需要用户干预进行设定^[3],因而不适合海洋监视卫星上的应用,而文献^[4]中提出的利用三阶矩和四阶矩提取遥感图像中 ROI 的方法对噪声敏感。国内外目前还尚未见针对海洋监视卫星遥感图像采用感兴趣区域压缩算法的有关报导。根据海洋监视卫星遥感图像近无损压缩的要求以及图像本身的特点,本文提

出了一种基于 ROI 的自适应近无损压缩算法,该算法可以自动确定 ROI,并对 ROI 进行无损压缩,适合海洋监视卫星应用。

2 算法描述

本文算法主要包括形态小波变换、ROI 的自动检测、ROI 的编码,如图 1 所示。首先对原始图像进行 3 级形态 Harr 小波变换,然后在高频子带中自动检测 ROI,对 ROI 进行 Rice 无损熵编码,对非 ROI 进行比特平面编码(Bit Plane Encoding, BPE),对 LL_3 低频子带进行 DPCM 和 Rice 编码。

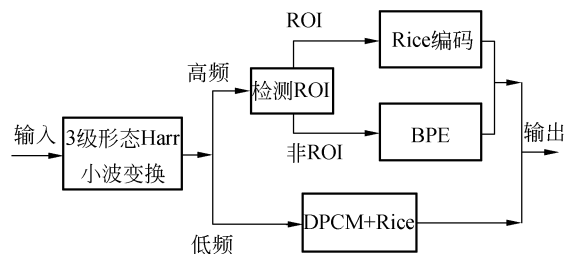


图 1 算法流程图

Fig. 1 Flow chart of algorithm

2.1 形态小波变换

形态小波变换是以数学形态学为基础的一种小波变换,兼顾了数学形态学的形态滤波特性和小波变换的多分辨率分析特性^[5-6]。由于数学形态学将图像看作是几何物体而不是 Hilbert 空间的元素,因而形态算子是非线性的^[7]。这种非线性小波具有良好的细节保留特性和抗噪声性能。

形态 Harr 小波提升和传统小波提升一样,包括 3 个步骤:分裂、预测和更新。

(1) 分裂:将原始数据 $x(n)$ 进行 Lazy 小波分解。

$$x_e(n) = x(2n); x_o(n) = x(2n+1)$$

(2) 预测:利用 $x_e(n)$ 来预测 $x_o(n)$,得到预测误差 $d(n)$ 。

$$d(n) = x_o(n) - \text{MAX}[x_c(n), x_c(n+1)]$$

(3) 更新:利用 $d(n)$ 更新 $x_c(n)$, 得到原始数据的一个近似 $c(n)$ 。

$$c(n) = x_c(n) + \text{MAX}[d(n-1), d(n), 0]$$

其中, $\text{MAX}[\]$ 为取最大值。更新算子 $\text{MAX}[d(n-1), d(n), 0]$ 为非负整数, 为了使更新后系数的动态范围较小, 本文将更新算子改为 $U = -\text{MAX}[d(n-1), d(n), 0]$ 。因此, 更新步骤为:

$$c(n) = x_c(n) - \text{MAX}[d(n-1), d(n), 0]$$

2.2 ROI 的自动检测

实现基于 ROI 的近无损压缩算法, 需要自动检测 ROI。国内外很多学者提出了一些 ROI 检测算法^[8-9], 这些算法可以很好地检测出 ROI, 但是时间开销较大, 不适合实时应用。由于海洋监视卫星遥感图像中的目标和海洋背景的反射率相差较大, 目标的边缘灰度变化比较剧烈, 因而可以采用基于边缘检测的方法进行感兴趣区域分割。直接在原图像中分割时对噪声敏感, 且计算量非常大, 而利用形态 Harr 小波最大提升后, 高频子带中很好地保留了局部最大值, 且不产生任何新的局部最大值, 所以本文采用在子带中进行 ROI 分割。

小波分解后的感兴趣区域在不同分辨率下具有相似的形状, 而且分辨率低的子带感兴趣区域对分辨率高的子带的感兴趣区域有预测全包含关系。例如, HL_3 (图 2) 的感兴趣区域经过 2×2 的 Mosaic 放大, 可以覆盖 HL_2 的感兴趣区域并有冗余, 经过 4×4 的 Mosaic 放大, 可以覆盖 HL_1 的感兴趣区域并有冗余^[10]。因而只需在第 3 级分解的一个子带中确定感兴趣区域即可。由于能

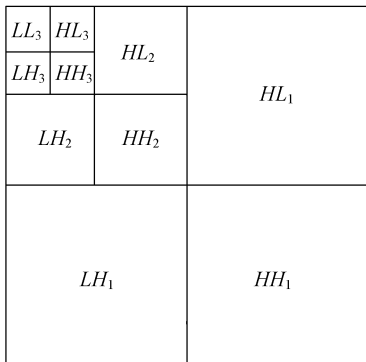


图 2 三级小波分解

Fig. 2 3-level wavelet decomposition

量较大的子带中包含绝对值大的系数较多, 不利于提取目标, 因此本文选择了在能量最小的 HH_3 子带中确定感兴趣区域的方案。

在 HH_3 子带中采用阈值处理和八邻域的多目标连通性分析方法^[11] 确定感兴趣区域。图 3 为 HH_3 子带的统计直方图, 从直方图分布中可以看出其系数分布近似于正态分布。根据概率统计学中的假设检验 3σ 法则, 阈值设为:

$$T = \lceil 3\sigma \rceil, \quad (1)$$

其中, σ 为 HH_3 子带的均方差, $\lceil \cdot \rceil$ 为向上取整。

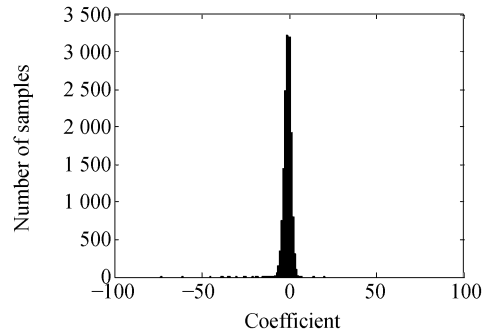


图 3 HH_3 子带系数统计直方图

Fig. 3 Histogram of HH_3 sub-band coefficients

在该子带中提取大值系数的位置信息, 生成一张二值映射表, 绝对值大于阈值的系数映射为 255, 绝对值小于阈值的系数映射为 0, 如图 4 所示, 其中包括了目标和噪声。



图 4 阈值处理后的 HH_3 子带

Fig. 4 HH_3 sub-band processed by threshold

对二值图像进行八邻域的多目标连通性分析, 使用其外接矩形描述 ROI, 并将小于最大矩形面积 5% 的目标作为假目标区域剔除, 如图 5。

对于任意形状的 ROI, 使用其外接矩形描述是最简单的方法, 但是有时矩形内包括了较多的背景 (如图 5), 降低了压缩比。本文提出了一种

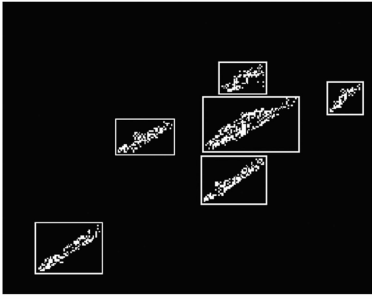


图 5 用外接矩形描述的 ROI

Fig. 5 ROI depicted by enclosing rectangle

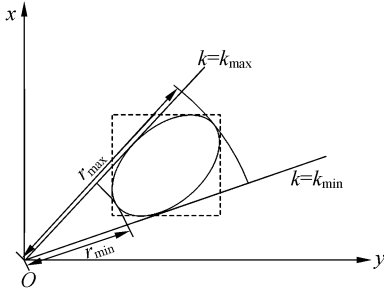


图 6 描述 ROI 的示意图

Fig. 6 Sketch map of ROI

用外接矩形和一段环面的交集描述 ROI 的方法。以 HH_3 子带的左下角为原点建立直角坐标系 (如图 6), 扫描各外接矩形, 计算每个连通区域中各点与原点连线的斜率 k 以及各点到原点的距离 r , 如式 2。其中, x 为行坐标, y 为列坐标, 子带左下角系数的坐标为 $(0, 0)$ 。

$$k = \frac{x}{y}; r = \sqrt{x^2 + y^2}. \quad (2)$$

记最大斜率为 k_{max} , 最小斜率为 k_{min} , 最大距离为 r_{max} , 最小距离为 r_{min} , 如图 6 所示。其中, r_{max} 为目标内切圆的半径, r_{min} 为目标外切圆的半径。斜率为 k_{max} 和 k_{min} 的两条直线与所夹的半径



图 7 HH_3 子带中的 ROI

Fig. 7 ROI of HH_3 sub-band

为 r_{max} 和 r_{min} 的两段弧组成的一段环面, ROI 为该环面与外接矩形 (图 6 中的虚线) 的交集。图 7 为 HH_3 子带中的 ROI。第 1 级和第 2 级的各子带的 k_{max} 、 k_{min} 、 r_{max} 和 r_{min} 的值如下:

$$\begin{aligned} k_{max1} &= k_{max} & r_{max1} &= 4r_{max} & r_{min1} &= 4r_{min} \\ k_{max2} &= k_{max} & r_{max2} &= 2r_{max} & r_{min2} &= 2r_{min} \end{aligned}$$

2.3 高频子带编码

各高频子带包含 ROI 和背景区域。为保证目标的重构质量, 对 ROI 采用无损压缩算法。目前无损压缩编码方法有很多, 考虑到实时性要求, 本文选择了简单的 Rice 无损熵编码方法。Rice 编码器^[12]是由 R. F. Rice 提出来的, 它包括了很多编码选项以适应数据统计特性的变化。但算法中较多的选项数目导致了表示这些选项的 ID 比特位的增加, 本文对此进行了优化, 优化后的 Rice 熵编码器结构如图 8 所示。

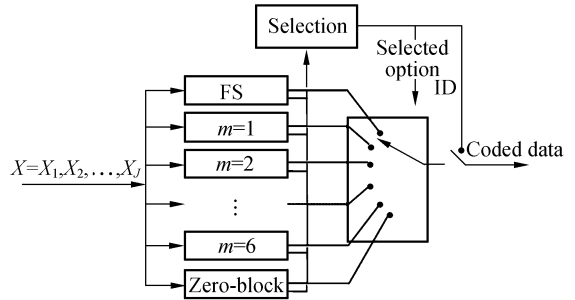


图 8 Rice 编码器的结构框图

Fig. 8 Architecture of Rice coder

2.3.1 基本序列 (Fundamental Sequence, FS) 选项

FS 选项是 Rice 算法中最基本的码字结构。在这种编码模式中, 码字包括一串“0”和一个“1”, “0”的个数等于样本值的十进制数值, “1”表示当前码字的结束, 这种简单的编码过程使得 FS 码字不需要查表就可以进行解码。表 1 为 FS 的编码过程。

表 1 FS 选项的编码实例

Tab. 1 Examples of FS option

样本值	FS 码字
0	1
1	01
2	001
...	...
$2^n - 1$	$\underbrace{000 \cdots 0001}_{2^n - 1}$

FS 编码能压缩数据的原因是样本数据中数值小的样本的出现频率高,而数值大的样本出现较少。

2.3.2 分裂样本(Split Sample)选项

分裂样本选项是 Rice 熵编码中最主要的选项。第 m 个分裂样本选项是从每个样本中分裂出 m 个最不重要的比特位,然后将剩余的部分进行 FS 编码,最后将两部分连接起来就是该选项的输出码字,如表 2 所示。

表 2 分裂样本选项实例

Tab.2 Examples of split-sample option

样本值	二进制表示	$k=1$	$k=2$
0	000	0 1	00 1
2	010	0 01	10 1
5	101	1 001	01 01
6	110	0 0001	10 01

2.3.3 零块选项

当一个块或多个块的样本值都为零时,就选择零块选项。在这个选项中,用 FS 选项对相邻零块的个数进行编码。

Rice 编码器一次可以处理 J 个数据, J 为任意值。实验结果表明, <16 的 J 值导致较低的压缩比, >16 的 J 值不能很好地适应数据源统计特性的变化。因此本文中参数 J 选为 16。 m 值是满足式(3)的 ≤ 6 的最大非负整数,

$$J \cdot 2^{m+7} \leq 128 \cdot \Delta + 49 \cdot J, \quad (3)$$

这里, Δ 是一个块中所有数据的和,

$$\Delta = \sum_{i=1}^J X_i. \quad (4)$$

由于背景区域的系数大多为零或接近于零,而且对重构图像的质量影响小,所以背景区域进行比特平面编码,直到指定的图像质量为止。

2.4 低频子带的编码

LL_3 低频子带包含了图像的绝大部分能量,因此需要对该子带进行无损或近无损压缩。由于 LL_3 子带大小仅为原图像的 $1/64$,而且保持了很好的动态范围,因此本文算法对该子带采用 DPCM 编码和 Rice 无损压缩编码的方法。

2.5 子带编码顺序

首先是 ROI 的编码,然后是 LL_3 低频子带,最后是高频子带。高频子带的顺序为从分辨率低

的子带到分辨率高的子带,在同一分辨率级时,按照 $LH \rightarrow HL \rightarrow HH$ 的顺序依次进行。

3 实验结果

仿真实验环境为 64 bit 处理器,512 MB 内存,Windows XP 操作系统,VC++6.0 以及 Matlab 7.0 仿真软件。表 3 和图 9 给出了本文的近无损压缩算法和 JPEG2000 感兴趣压缩算法的性能比较。为了使目标无损,JPEG2000 选择了 3 级 5/3 小波变换。从表中可以看出,形态 Harr 小波变换所用时间仅为 5/3 小波变换一半左右;JPEG2000 需要手动指定 ROI,而本文算法可以自动确定 ROI;目标都保持无失真。从图 9 可以看出,在中低比特率时,本文算法的峰值信噪比(Peak Signal Noise Ratio, PSNR)比 JPEG2000 的高 2~5 dB,在高比特率时,两者的 PSNR 均在 45 dB 以上,且 JPEG2000 的略高。图 10(a)为原图像,图 10b(1)、c(1)、d(1)分别为利用本文算法在 2,1,0.5 bit/pixel 时的重构图像,图 10b(2)、c(2)、d(2)分别为利用 JPEG2000 算法在 2,1,0.5 bit/pixel 时的重构图像。从图 10 中可以看出,在中低比特率时,本文算法没有明显的分割痕迹,重构图像质量较好,在高比特率时,两种算法的重构图像质量都很好。

表 3 压缩性能比较

Tab.3 Comparison of compression performance

	JPEG2000	本文算法
小波变换时间(ms)	31	16
ROI 的确定方式	手动	自动
目标保真程度	无损	无损

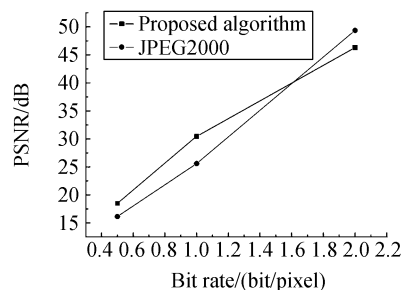
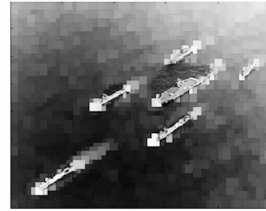


图 9 本文算法与 JPEG2000 的比较

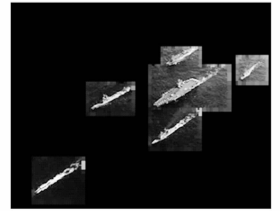
Fig. 9 Comparison of proposed algorithm and JPEG2000



(a) 原图像
(a) Original image



(d1) 本文算法的重构图像
(0.5 bit/pixel)
(d1)Reconstructed image
of proposed algorithm
(0.5 bit/pixel)

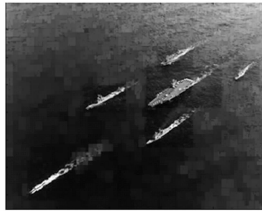
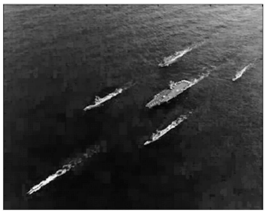


(d2) JPEG2000 的重构图像
(0.5 bit/pixel)
(d2)Reconstructed image
of JPEG2000
(0.5 bit/pixel)



(b1) 本文算法的重构图像
(2 bit/pixel)
(b1)Reconstructed image
of proposed algorithm
(2 bit/pixel)

(b2) JPEG2000 的重构图像
(2 bit/pixel)
(b2)Reconstructed image
of JPEG2000
(2 bit/pixel)



(c1) 本文算法的重构图像
(1 bit/pixel)
(c1)Reconstructed image
of proposed algorithm
(1 bit/pixel)

(c2) JPEG2000 的重构图像
(1 bit/pixel)
(c2)Reconstructed image
of JPEG2000
(1 bit/pixel)

图 10 航母群

Fig. 10 A group of aircraft carriers

4 结 论

根据海洋监视卫星遥感图像中目标和背景反射率相差较大的特点和星上应用的要求,本文提出了一种基于 ROI 的自适应近无损压缩算法。该算法使用外接矩形与一段环面的交集来更确切地表示 ROI,而且可以自动确定,使得地面干预程度达到最小水平。ROI 采用了基于统计特性的 Rice 无损压缩算法,既保证了遥感图像目标不失真,又能适应数据统计特性的变化。在中低比特率下,重构图像的质量较 JPEG2000 的有较大的提高,而且图像没有明显的 ROI 分割痕迹,重构质量较好。压缩后的数据可以分组传输,能有效地限制误差扩散。算法复杂度低,易于硬件实现,适用于海洋监视卫星上遥感图像压缩。

参考文献:

[1] YEH P SH, VENBRUX J, BHATIA P, *et al.*. A real-time high performance data compression technique for space applications[C]. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Proceedings*, 2000;612-614.

[2] YEH P SH, MOURY G, ARMBRUSTER P, *et al.*. The CCSDS data compression recommendations: development and status[J]. *SPIE*, 2002, 4790:302-313.

[3] 邓家先. 基于重要系数提升的遥感图像压缩[J]. *光学 精密工程*, 2006, 14(5):910-916.

DENG J X. A remote-sensing image coding algorithm based on significant coefficients lifting[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(5):910-916. (in Chinese)

[4] 张宝薇, 陈浩, 张晔. 一种针对遥感图像的自动 ROI 编码算法[J]. *光电技术应用*, 2006, 21(4):64-70.

- ZHANG B W, CHEN H, ZHANG Y. An automatic ROI coding algorithm for remote sensing images[J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2006,21(4):64-70. (in Chinese)
- [5] 余莉,王润生,韩方剑. 多分辨率形态学目标检测[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2006,18(6):849-853.
YU L, WANG R SH, HAN F J. Multiresolution morphological object detection[J]. *Journal of Computer-aided Design & Computer Graphics*, 2006,18(6):849-853. (in Chinese)
- [6] 刘循,游志胜. 形态小波变换及其在图象编码中的应用[J]. 四川大学学报(自然科学版), 2003,40(1):69-73.
LIU X, YOU ZH SH. A method of morphological wavelet decomposition and its application in image coding[J]. *Journal of Sichuan University(Natural Science Edition)*, 2003,40,(1):69-73. (in Chinese)
- [7] HEIJMANS H J A M, GOUSTIAS J. Morphology-based perfect reconstruction filter banks[C]. *Proceedings of the IEEE-SP International Symposium on Time-frequency and Time-Scale Analysis*, 1998,10:353-356.
- [8] ITTI L, KOCH C, NIEBUR E. A model of saliency-based visual attention for rapid scene analysis[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1998,20(11):1254-1259.
- [9] KADIR T, SALIENCY B M. Scale and image description[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2001,45(2):83-105.
- [10] 毋立芳,沈兰荪,张晓玲. 基于感兴趣区的图象近无损压缩[J]. 中国图象图形学报, 2001,6A(6):528-532.
WU L F, SHEN L S, ZHANG X L. Near-lossless image compression based on lossless regions of interest(ROI) [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2001,6A(6):528-532. (in Chinese)
- [11] 魏仲慧,何昕,郝志航. 多目标的实时连通性分析方法[J]. 光学精密工程, 1995,3(4):23-26.
WEI ZH H, HE X, HAO ZH H. A new method of real-time connectivity analysis for convex objects[J]. *Opt. Precision Eng.*, 1995,3(4):23-26. (in Chinese)
- [12] RICE R F, YEH P S, MILLER W. Algorithm for a very high speed universal noiseless coding module[R]. *Pasadena, CA: Jet Propulsion Laboratory*, 1991.

作者简介:隋玉萍(1980—),女,山东威海人,在读博士研究生,主要从事数字图像压缩方面的研究。E-mail:cindysyp@sina.com

何昕(1966—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,主要从事数字图像处理方面的研究。E-mail:hexin6627@sohu.com

●下期预告

摇摆台负载自适应技术研究

陈洪立^{1,2},翟林培¹,肖占全^{1,2}

(1.中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033

2.中国科学院 研究生院,北京 100049)

为了对不同型号的航空相机进行地面试验,需要设计一套具有负载自适应功能的摇摆台系统,为此研究了摇摆台负载自适应技术。根据相机的重量变化范围,结合已设计好的摇摆台机电结构,通过理论分析及仿真试验的方法研究了负载(航空相机)大小与电位计(位置反馈器件)反馈信号幅值间的关系,结合数值计算法提出了一种自动测量负载大小的新方法。该方法首次被提出且容易实现,对于大部分现有的数字控制系统不需要添加任何器件,只需加段程序即可使用。研究结果表明四次多项式拟合的相关系数 R^2 为 0.997 3,均方差 RMSE 为 0.171 6;五次多项式拟合的相关系数 R^2 为 0.999 6,均方差 RMSE 为 0.063 8。进一步分析认为五次多项式拟合满足研究的负载自适应摇摆台精度要求。