

一种基于轮廓监督的动态规划乳腺 X 线影像肿块分割算法

郝欣, 夏顺仁

浙江大学; 生物医学工程教育部重点实验室, 杭州 310027

摘要 肿块分割是基于乳腺 X 线影像的计算机辅助诊断系统的重要环节。良好的分割结果能够更好地反映肿块的病理特征, 为后续可疑区域的特征提取和分类提供依据。已有大量文献探讨肿块的分割算法。基于动态规划 (DP) 的肿块分割算法结合了肿块的边缘信息, 以及灰度和大小等先验知识。传统的基于 DP 的算法自适应性和鲁棒性不足。为克服这些缺点, 提出一种基于轮廓监督的动态规划方法, 该方法首先使用对比度受限的自适应直方图均衡增强肿块感兴趣区 (ROI) 的对比度, 并使用高斯掩膜掩蔽外围组织; 然后, 将肿块 ROI 变换到极坐标, 结合肿块的边缘、灰度和大小信息计算局部代价, 并根据局部代价矩阵计算累积代价矩阵; 最后, 在基于动态规划的轮廓跟踪过程中, 引入轮廓监督机制, 避免周围组织和对对比度不足的影响。本文对比了改进后算法与传统算法的分割效果。实验结果表明, 高斯掩蔽和轮廓监督的引入, 有效地掩蔽了肿块周围组织, 避免了轮廓偏离。该算法提高了肿块分割准确性, 且具有更好的鲁棒性。

关键词 动态规划; 乳腺 X 线影像; 肿块分割; 计算机辅助诊断

中图分类号 R318

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2009)21-0056-05

A Dynamic Programming Algorithm for Mass Segmentation on Mammograms Based on Contour Supervision

HAO Xin, XIA Shunren

Key Laboratory of Biomedical Engineering of Ministry of Education; Zhejiang University, Hangzhou 310027, China

Abstract Mass segmentation plays a crucial role in Computer-Aided Diagnosis (CAD) systems on mammograms. Good segmentation result can better reflect the pathological characteristics of mass. And it can provide basis for the subsequent feature extraction and classification of suspicious region. At present, lots of literatures of mass segmentation have been proposed. Dynamic Programming (DP) based mass segmentation algorithm uses edge information as well as the priori knowledge of grey level and size

information of mass. But the traditional DP based algorithm has low adaptability and robustness in mammograms. In order to overcome these shortcomings, an improved dynamic programming method was presented. Firstly, the Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization (CLAHE) was used to improve contrast of Region of Interest (ROI) about mass. And the Gaussian mask was used to mask the surrounding tissues. Then, transform the ROI into polar coordinate and calculate the local cost matrix combining the edge, grey level and size information of mass. And the cumulative cost matrix was calculated using the local cost matrix. Finally, in the process of contour tracing based on dynamic programming, the contour supervision mechanism was introduced to avoid the contour departure, which is caused by the low contrast and the influence of surrounding tissues. The segmentation results of improved algorithm are compared with the traditional algorithm. The experimental results show that the introduction of Gaussian mask and contour supervision can effectively mask the surrounding tissue and avoid the contour departure. The proposed algorithm improved the segmentation accuracy. It is more robust than the conventional methods.

Keywords dynamic programming; mammogram; mass segmentation; computer-aided diagnosis

收稿日期: 2009-09-10

基金项目: 国家自然科学基金项目 (60772092)

作者简介: 郝欣, 博士研究生, 研究方向为医学图像处理、计算机辅助诊断, 电子信箱: sarah.xin@gmail.com; 夏顺仁 (通信作者) (中国科协所属全国学会个人会员登记号: M0831001596), 教授, 研究方向为医学图像处理、计算机辅助诊断、基于内容的医学图像检索, 电子信箱: srxia@zju.edu.cn

0 引言

乳腺癌是女性中高发恶性肿瘤疾病。钼靶乳腺 X 线成像是目前公认的乳腺癌早期诊断的首选方法^[1]。基于乳腺 X 线影像的计算机辅助诊断 (Computer-aided Diagnosis, CAD) 系统,能够协助临床医生检测影像中的可疑病灶,大大降低了诊断的假性率。肿块分割是 CAD 系统的重要环节,良好的分割结果能够更好地反映肿块的病理特征,为后续特征提取和分类提供依据。目前,已有大量文献探讨肿块的分割算法。

常见的肿块分割方法包括阈值法^[2]、区域生长^[2-3]、活动轮廓模型^[4-5]等。对于对比度较高、轮廓清晰的肿块,上述方法均能取得较好的分割效果;但对于边界模糊、受周围组织遮蔽的肿块,则难以获得理想的结果。文献[6]提出一种基于动态规划的

肿块分割方法。首先,将肿块感兴趣区 (Region of Interest, ROI) 变换到极坐标下,并结合肿块的边缘、大小和灰度信息构建代价矩阵。然后,在极坐标下使用动态规划 (Dynamic Programming, DP) 方法进行轮廓跟踪,获得最终分割结果。该方法与区域生长、活动轮廓模型的对比结果显示,基于 DP 的分割方法能有效避免周围组织的影响,提高了肿块分割的准确性^[6]。文献[7]在文献[6]的基础上,通过改进代价函数各分量的公式和自适应选择分量权值,进一步提高了动态规划方法的性能。但上述两种方法对肿块增强效果不足,且忽视了在肿块弱边缘处,动态规划容易出现轮廓偏离的问题,导致分割结果的鲁棒性和准确性不足。为此,本文提出一种基于轮廓监督的动态规划肿块分割方法。算法的基本流程如图 1 所示。



图 1 算法基本流程

Fig. 1 Framework of the algorithm

1 材料与方法

1.1 图像数据

本文使用美国南佛罗里达大学乳腺 X 线影像数据库 (Digital Database for Screening Mammography, DDSM), 图像中包含了影像学家手动标记的肿块大致区域, 以及对应的确诊信息。本文首先将图像缩小至原始尺寸的 1/4, 并将灰度动态范围由 12 bit 调整至 8 bit。然后, 根据人工标记的肿块区域, 提取中心位于肿块内部, 大小为 256×256 像素的 ROI。

1.2 图像增强

由于乳腺图像对比度低, 且肿块容易为周围组织遮蔽。因此, 在增强肿块对比度的同时, 还要抑制周围组织的影响。本文使用文献[5]提出的非线性肿块增强方法。首先, 利用对比度受限自适应直方图均衡增强 ROI 对比度, 同时抑制噪声影响; 然后, 使用直方图均衡化、均值滤波等方法进一步调整 ROI 的灰度范围, 提升肿块的对比度; 再以 ROI 中心 (x_c, y_c) 为原点, 将肿块区域变换到极坐标。根据肿块灰度沿半径增大的方向逐渐减小的特性^[5], 自适应地选择高斯掩膜的半径 r_c , 并构建与 ROI 大小相同、中心在 (x_c, y_c) 、半径为 r_c 的高斯掩膜。最后, 将高斯掩膜与 ROI 相乘, 从而抑制肿块外围组织的影响。

1.3 动态规划

基于动态规划的轮廓跟踪可视为寻找由起点集到终点集的最佳路径, 在医学图像处理中, 常用于寻找脊柱、血管等狭长结构的边缘^[6]。

1.3.1 极坐标变换

肿块的边缘是类圆形的封闭曲线^[6], 为了将动态规划方法应用于肿块分割, 首先将肿块区域变换到极坐标。设肿块区域 $I(x, y)$ 的中心坐标为 (x_c, y_c) , 根据

$$\begin{cases} x=x_c+r\sin\theta \\ y=y_c+r\cos\theta \end{cases} \quad (1)$$

得到极坐标下的肿块区域为 $I_p(r, \theta)$, 其中 $r=1, 2, \dots, 128; \theta=1, 2, \dots, 360$ 。

1.3.2 局部代价和累积代价

根据动态规划的思想, 极坐标下肿块轮廓的检测可视为寻找 $I_p(r, \theta)$ 第一列像素到最后一列像素之间的最佳路径, 该路径应当具有最小的累积代价 (cumulative cost)。其中, 累积代价由像素的局部代价 (local cost) 确定^[6]。

为了获得准确的肿块分割结果, 结合肿块特征定义适当的局部代价函数是基于动态规划的肿块分割的关键环节。文献[6]结合了肿块的边缘、灰度和大小 3 个分量构建极坐标下的局部代价函数如下:

$$c(r, \theta)=w_e e(r, \theta)+w_g g(r, \theta)+w_s s(r, \theta) \quad (2)$$

其中, $e(r, \theta)$ 为边缘分量, $g(r, \theta)$ 为灰度分量, $s(r, \theta)$ 为尺寸分量, 各分量均被归一化至 $[0, 1]$ 。 w_e, w_g 和 w_s 分别为对应分量的权值, $w_e+w_g+w_s=1$ 。

边缘分量 $e(r, \theta)$ 利用了 I_p 的梯度信息, 定义为

$$e(r, \theta)=\frac{\max(\|\nabla I_p\|)-\|\nabla I_p(r, \theta)\|}{\max(\|\nabla I_p\|)} \quad (3)$$

其中, $\max(\|\nabla I_p\|)$ 为 I_p 梯度的最大模值, $\|\nabla I_p(r, \theta)\|$ 为点 (r, θ) 处的梯度模值。

灰度分量 $g(r, \theta)$ 的定义为

$$g(r, \theta)=\sqrt{|I_p(r, \theta)-\mu|} \quad (4)$$

其中, $\mu=\alpha\mu_{\text{mass}}+(1-\alpha)\mu_{\text{background}}$, μ_{mass} 和 $\mu_{\text{background}}$ 分别为肿块和背景的灰度均值, α 为小于 1/2 的权值。

尺寸分量 $s(r, \theta)$ 定义为

$$s(r, \theta) = \begin{cases} (r - \mu_{\text{radii}})^2 & r < m \\ (m - \mu_{\text{radii}})^2 & r \geq m \end{cases} \quad (5)$$

其中, μ_{radii} 为肿块的平均半径, m 是代价限制因子, 避免在肿块较大的情况下, $s(r, \theta)$ 成为决定局部代价的主要因素。

为了计算上述 3 个分量, 文献[6]通过统计大量肿块确定 μ_{mass} , $\mu_{\text{background}}$ 和 μ_{radii} 。然而, 肿块的灰度、大小复杂多变, 统计均值并不能很好地反映单个肿块的灰度和尺寸特征。此外, 肿块形态并不是规则的圆形, 使用平均半径定义的尺寸分量在局部代价函数中起到的作用并不明显。因此, 本文使用一种基于 ROI 增强的方法估计当前肿块的 μ_{mass} , $\mu_{\text{background}}$ 和 μ_{radii} 。同时, 去掉了代价函数中的尺寸分量。改进后的代价函数为

$$c(r, \theta) = w_e e(r, \theta) + w_g g(r, \theta) \quad (6)$$

基于 ROI 增强方法估计 μ_{mass} , $\mu_{\text{background}}$ 和 μ_{radii} 的具体步骤如下。

1) 对 $I(x, y)$ 做窗口大小为 3×3 像素的均值滤波, 得到 $\bar{I}$,

并求 $I(x, y)$ 的梯度 ∇I 。

2) 根据公式(7)得到 I_1 , 并将其灰度归一化至 $[0, 1]$ 。该方法结合了梯度信息, 在进一步提高肿块与周围组织的对比度的同时, 保留了边缘信息[8]。

$$I_1 = -(\beta \|\nabla I\| + \exp(-(I - I_{\text{mean}})^2 / \sigma^2)) \quad (7)$$

其中, I_{mean} 为目标的期望灰度, β 为梯度分量的权值, σ 控制对比度。本文选择 I_{mean} 为 $I(x, y)$ 的灰度均值, $\beta = 0.3$, $\sigma = 0.05$ 。

3) 根据 I_1 的灰度直方图特性, 选择阈值 $T = 0.6$, 根据公式(8)对 I_1 进行二值化, 得到 I_b , 并使用形态学方法去除 I_b 中的细小结构和连接。

$$I_b = \begin{cases} 1 & I_1 > T \\ 0 & I_1 \leq T \end{cases} \quad (8)$$

图 2 显示了二值化的肿块 ROI。对比图 2(a) 和 2(b) 可知, I_b 的白色部分包含了肿块的大致区域, 以及周围与肿块灰度相近的组织。因此, 可以使用 I_b 中白、黑色标记区域估计灰度分量 $g(r, \theta)$ 中肿块和背景的灰度均值 μ_{mass} 和 $\mu_{\text{background}}$ 。

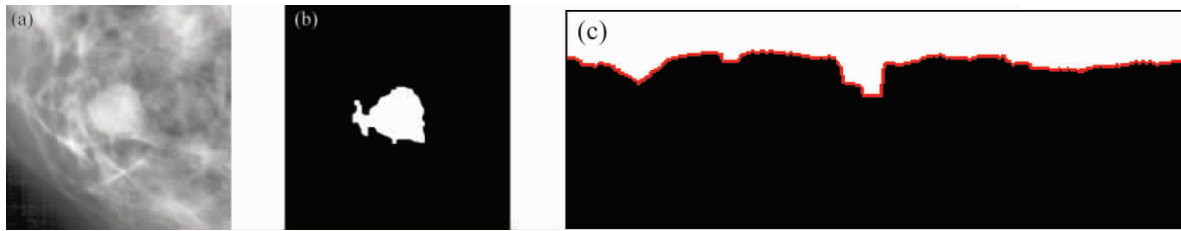


图 2 原 ROI(a)、二值化后的 ROI(b) 和极坐标下的二值 ROI(c)

Fig. 2 Original ROI (a), Binary ROI (b), and Binary ROI in polar coordinates (c)

4) 将 I_b 变换到极坐标, 得到 $I_{b, \text{polar}}$, 如图 2(c) 所示。计算每列上黑白区域交界点的半径, 将其平均值作为 μ_{radii} , 并将这些点构成轮廓作为动态规划时的监督轮廓 P_s (如图 2(c) 中的红色曲线)。

$$P_s = \{p_{si} = (r_{si}, \theta_{si}) | i = 1, 2, \dots, M\} \quad (9)$$

$$\mu_{\text{radii}} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M r_{si}$$

其中, p_{si} 为监督轮廓 P_s 上的点, 其坐标为 (r_{si}, θ_{si}) , $p_{si} = (r_{si}, \theta_{si})$ 对应第 i 列上黑白区域的交界点, $M = 360$ 为路径长度。 μ_{radii} 和 P_s

将在后续的动态规划过程中作为路径搜索的监督标准。

根据文献[6]的定义, 累积代价 C 由局部代价 c 迭代计算得到, 即

$$\begin{cases} C(r, 0) = c(r, 0) \\ C(r, \theta + 1) = \min_{-2 \leq l \leq 2} (C(r + l, \theta)) + c(r, \theta + 1) \end{cases} \quad (10)$$

根据公式(10)得到极坐标下的累积代价矩阵 $C(r, \theta)$ 。图 3 显示了肿块 ROI 和对应的累积代价矩阵。根据局部代价和累积代价的定义, 接近肿块边缘的像素具有较小的累积代价[9], 即灰度值较小。由此, 肿块轮廓跟踪就是寻找由 $C(r, \theta)$ 第 1 列像

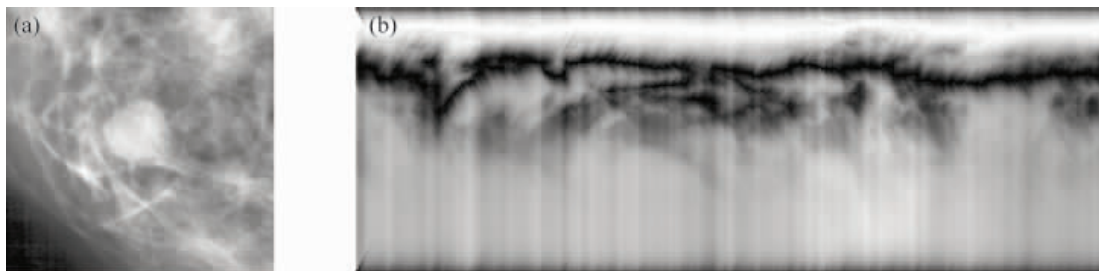


图 3 肿块 ROI(a) 和对应的累积代价矩阵(b)

Fig. 3 Mass ROI (a) and its cumulative cost matrix (b)

素到最后一列像素之间的累积代价最小的路径。

1.3.3 轮廓跟踪

设代表肿块轮廓的某条路径的表达式为

$$P=\{p_i=(r_i, \theta_i)|i=1, 2, \cdots, M\} \quad (11)$$

其中, p_i 为第 i 列上的点, 路径长度 $M=360$ 。考虑到肿块轮廓的连续封闭特性, 该路径的起点和终点相同, 即 $p_1=p_M$ 。同时, 后一个点应当在前一个点的邻域内, 即 $p_{k+1} \in N(p_k)$, 本文将该邻域定义为

$$N(p_k)=\{(r_{k-2}, \theta_{k+1}), (r_{k-1}, \theta_{k+1}), (r_k, \theta_{k+1}), (r_{k+1}, \theta_{k+1}), (r_{k+2}, \theta_{k+1})\} \quad (12)$$

在满足上述条件的情况下, 肿块轮廓应当具有最小的累积代价, 设长度为 M 的最优路径为 P_M^{optimal} , 则

$$\begin{aligned} P_M^{\text{optimal}} &= \min(C(p_1)+C(p_2)+\cdots+C(p_M)) \\ &= \min[\min(C(p_1)+C(p_2)+\cdots+C(p_{M-1})), C(p_M)] \\ &= \min(P_{M-1}^{\text{optimal}}, C(p_M)) \end{aligned} \quad (13)$$

同理, P_{M-1}^{optimal} 可以通过 P_{M-2}^{optimal} 得到, 这一类问题可以使用动态规划算法得到解决^[8]。动态规划的轮廓跟踪的基本流程如下。

1) 定义大小与累积代价矩阵相同, 初始值为零的路径矩阵 D 。确定起始点 p_1 , 令当前点 $p_c=p_1$, $D(p_c)=1$ 。

2) 遍历 p_c 的邻域 $N(p_c)$, 找出其中累积代价最小的点 $p=\min(N(p_c))$, 令 $p_c=p$, $D(p_c)=1$ 。

3) 若 p_c 已经位于累积代价矩阵的最后一列, 取出 D 中值为 1 的点, 即为肿块轮廓。否则, 重复步骤 2)。

由于肿块的边界并非十分清晰, 同时受到周围组织的干扰, 在弱边缘处, 上述路径搜索过程极易偏离正确的位置。如

前所述, 在计算局部代价的过程中, 同时得到了肿块的平均半径 μ_{radius} 和监督轮廓 P_s 。本文利用 μ_{radius} 和 P_s , 在上述动态规划的步骤 (2) 中加入轮廓监督和校正的环节。首先, 遍历 p_c 的邻域 $N(p_c)$, 找出其中累积代价最小的点 $p=\min(N(p_c))$, 设 p 的坐标为 (r_i, θ_i) , 则对应列上监督轮廓的点为 $p_{si}=(r_{si}, \theta_{si})$, 使用 p 和 p_{si} 中最接近 μ_{radius} 的点作为当前点 p_c , 并继续后续步骤。

为了保证轮廓闭合, 即 $p_1=p_M$, 本文采用文献[6]中的方法, 将大小为 $r \times \theta$ 3 个累积代价矩阵首位相接, 得到一个大小为 $r \times 3\theta$ 的扩展累积代价矩阵, 并在此基础上进行动态规划轮廓搜索, 最后使用 $[\theta, 2\theta]$ 范围内的轮廓作为最终的检测结果。

2 实验结果

本文选择 DDSM 数据库中 46 幅包含肿块的 ROI 进行测试, 测试结果显示, 在肿块对比度不足、边缘不清晰, 或周围有大量灰度较高的组织干扰时, 原来的动态规划方法容易出现轮廓偏离, 导致分割结果偏离肿块的真实轮廓。而改进后的动态规划能够在迭代轮廓跟踪的过程中, 自动监督轮廓偏离, 并进行校正, 避免了大的轮廓偏离现象, 提高了分割方法的稳定性和准确性。

图 4 是原方法与本文方法的分割比较。其中, 第 1 列为肿块 ROI, 第 2 列为原方法的分割结果, 第 3 列为改进方法的分割结果。

图 4(a)~4(c) 中有一个较小的良性肿块, 其周围存在大量灰度较高的组织, 在动态规划过程中, 原方法受到周围结构的干扰, 出现了轮廓偏离现象。本文方法的分割结果, 更加

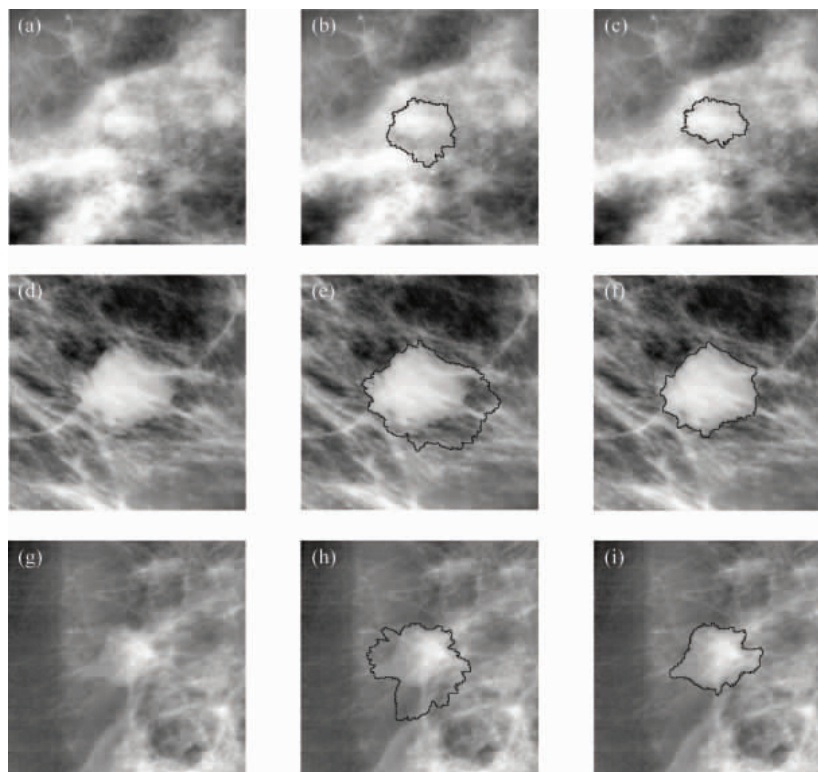


图 4 原方法和改进方法的分割结果

Fig. 4 Segmentation results of the original method and the improved method

接近肿块的真实轮廓。图 4(d)~4(f)中的肿块与周围组织的对比度较高,周围只有少数组织粘连。但原方法在这些组织粘连的弱边缘位置出现了轮廓偏离,而改进后的方法能够校正这种偏离现象,使得分割结果更加准确。图 4(g)~4(i)中肿块本身的灰度不均匀,右侧的对比度较高,左侧则对比度较低,且边缘模糊。原方法在对比度较低的一侧出现了轮廓偏离,而改进方法则能够保证肿块轮廓沿正确的位置延伸。

3 结论

本文针对原有的基于动态规划肿块分割方法容易受到周围组织和肿块对比度不足的影响,出现轮廓偏离等问题,提出一种改进的基于轮廓监督的动态规划肿块分割方法。该方法能够在动态规划轮廓跟踪的过程中自动监督和校正轮廓偏离。实验结果表明,改进后的方法能有效提高分割算法的稳定性和准确性。利用本文方法得到的肿块效果,能够更好地反映肿块的真实形态,为后续的特征提取、肿块分类等环节提供依据。

参考文献 (References)

- [1] 夏顺仁, 吕维雪. 乳腺 X 线图像的计算机辅助诊断技术研究进展[J]. 国外医学生物医学工程分册, 2000, 23(1): 24-28.

- Xia Shunren, Lu weixue. *Foreign Medical Sciences: Biomedical Engineering*, 2000, 23(1): 24-28.
- [2] Xu W D, Xia S R, Duan H L, *et al.* Segmentation of mass in mammograms using a novel intelligent algorithm[J]. *International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 2005, 20(2): 255-270.
- [3] Kupinski M A, Giger M L. Automated seeded lesion segmentation on digital mammograms[J]. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 1998, 17(4): 510-517.
- [4] Yuan Y D, Giger M L, Li H, *et al.* A dual-stage method for lesion segmentation on digital mammograms [J]. *Medical Physics*, 2007, 34(11): 4180-4193.
- [5] Ball J E, Bruce L M. Digital mammographic computer aided diagnosis using adaptive level set segmentation[C]//Proceedings of the 29th Annual International Conference of the IEEE EMBS. 2007: 4979-4984.
- [6] Timp S, Karssemeijer N. A new 2D segmentation method based on dynamic programming applied to computer aided detection in mammography[J]. *Medical Physics*, 2004, 31(5): 958-971.
- [7] Dominguez A R, Nandi A K. Improved dynamic-programming-based algorithms for segmentation of masses in mammograms [J]. *Medical Physics*, 2007, 34(11): 4256-4269.
- [8] Zhang Y, Matuszewski B J, Shark L K, *et al.* A novel medical image segmentation method using dynamic programming [C]//Proceedings of the International Conference on Medical Information Visualisation—BioMedical Visualisation. 2007: 69-74.

(责任编辑 代丽)

·学术动态·

“第 10 届人-机-环境系统工程大会”征文



为了极大推动中国人-机-环境系统工程研究的进一步繁荣和发展,“第 10 届人-机-环境系统工程大会”定于 2010 年 10 月在海南省三亚市召开。本届大会旨在广泛交流人-机-环境系统工程理论及应用方面的研究成果和实践经验,并为生产力的发展出谋划策。本届大会由中国系统工程学会人-机-环境工程专业委员会主办,美国科研出版社 (Scientific Research Publishing, SRP) 协办,北京市海淀区人-机-环境系统工程研究会承办。征集论文范围如下。

- 1) 人的特性研究:人的工作能力,人的基本素质的测试与评价,人的体力负荷、脑力负荷和心理负荷,人的可靠性,人的数学模型(控制模型和决策模型),人体测量技术,人员的选拔和训练等。
- 2) 机的特性研究:被控对象动力学的建模技术,机的可操作性,机的可维护性,机的本质安全性(防错设计)等。
- 3) 环境特性研究:环境检测技术,环境控制技术,环境建模技术等研究。
- 4) 人-机关系研究:静态人-机关系(作业域的布局与设计),动态人-机关系(人-机界面研究,显示和控制技术,人-机界面设计及评价技术,人、机功能分配,人、机功能比较,人、机功能分配方法,人工智能),多媒体技术在人-机关系研究中的应用,数字人体在人-机关系研究中的应用等。
- 5) 人-环关系研究:环境对人影响,人对环境影响,个体防护措施等。
- 6) 机-环关系研究:环境对机器性能影响,机器对环境的影响等。
- 7) 人-机-环境系统总体性能(安全、高效、经济):人-机-环境系统总体数学模型,人-机-环境系统模拟(数学模拟、半物理模拟和全物理模拟)技术,人-机-环境系统总体性能(安全、高效、经济)的分析和评价,虚拟技术(Virtual Reality)在系统总体性能研究中的应用等。
- 8) 人-机-环境系统工程理论及应用研究:人-机-环境系统工程理论,人-机-环境系统工程在国民经济各部门(如航空、航天、航海、武器装备、核工业、能源、交通、运输、管理、企业生产等)中的应用等。

论文截稿日期:2010 年 2 月 28 日。

联系方式:北京市海淀区圆明园西路 1 号航天医学工程研究所四室(100193) 龙升照;电话:010-66362271,13717629258;电子邮箱:mmese@sina.com。