

Automatic Tilt Correcting Algorithm for PSA Images Based on Radon Transform and Power Spectrum*

LUO Xiaogang^{1*}, WANG Denuan¹, HOU Changjun¹, HUO Danqun¹, YI Bin²

(1. Bioengineering Department, Chongqing University, Chongqing 400030, China;
2. Luzhou Laojiao Co. Ltd, Luzhou Sichuan 646000, China)

Abstract: An image tilt correcting algorithm for porphyrin sensor array (PSA) images is presented, in response to the phenomenon that PSA images may have a small tilt angle. The algorithm obtains the tilt angle of porphyrin sensor array images based on radon transform and power spectrum. Meanwhile, combining morphological methods, the processing of filtering and contrast enhancing for PSA images is carried out as the first step, then the binary boundaries of the images, which are used as the inputs of tilt correcting operations, are obtained using morphological method. The algorithm has solved the problem of result instability using the method of radon transform, made up for the high cost of computing using the method of power spectrum and improved the accuracy of correction. With the algorithm, a lot of tests have been done for the porphyrin sensor array images. The results showed that this algorithm could gain a good performance.

Key words: image preprocessing; tilt correct; radon transform; power spectral

EEACC: 6135; 6140C

doi: 10.3969/j.issn.1004-1699.2011.09.014

Radon 变换与功率谱结合的 PSA 图像倾斜度自动校正算法*

罗小刚^{1*}, 汪德暖¹, 侯长军¹, 霍丹群¹, 易彬²

(1. 重庆大学生物工程学院, 重庆 400030;
2. 泸州老窖股份有限公司, 四川 泸州 646000)

摘要: 针对卟啉传感阵列 (PSA) 图像中卟啉点阵列可能发生倾斜的现象, 设计了一种自动校正算法。算法之初对图像进行滤波、对比度增强操作, 并求得图像的二值形态学边界, 利用此二值边界图像作为求取倾斜角度运算的输入, 减少了噪声的影响, 同时也降低了时间的花费; 而后利用 radon 变换与功率谱结合的方法来求取倾斜角度, 解决了单纯的 radon 变换法易受空域噪声的影响, 使得校正的精度大大提高。利用该算法对卟啉传感阵列图像进行自动校正测试, 结果表明该算法能够获得很好的校正效果。

关键词: 图像预处理; 倾斜校正; radon 变换; 功率谱估计

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2011)09-1296-05

随着社会工业的发展, 越来越多的有害气体出现的人类生存的环境中, 严重危害人类的健康, 因此对有毒气体的快速、准确的检测是很有必要的。各种化学传感器^[1-5] 已经被设计出来检测微量气体, 其中, 比较广泛的是利用化学传感器阵列^[6-10] 来进行微量气体的检测。卟啉具有显著的分子识别效应, 当卟啉配合物与毒气接触后, 配合物表面颜色

有明显的变化, 且这种颜色变化具有唯一性, 同时完全不受环境湿度的影响, 还具有可逆性, 因此卟啉作为气敏材料能够获得很好的检测效果。本实验室利用卟啉配合物已制备出检测微量有毒气体的卟啉传感阵列 (PSA)^[11-12], 并获得了很好的检测效果。

基于 PSA 的毒气检测系统是通过图像处理算法获得与待测毒气接触前后 PSA 的图像中每个卟

项目来源: 国家“863”项目 (2006AA04z349); 国家自然科学基金项目 (30770568); 中央高校基本科研业务费项目 (CDJXS10231117); 教育部高校博士点基金项目 (20090191110030); 重庆市自然科学基金项目 (CSTC, 2009BB5219, 2008AC7037)

收稿日期: 2011-03-29 修改日期: 2011-04-30

咻点的颜色变化信息,来判定待测毒气的特征信息,所以对PSA图像进行高质量的处理是检测系统的首要任务。实验过程中由于操作的误差,PSA放置的位置有可能发生倾斜,使得咻阵列偏离准直方向,不利于后续的图像处理,因此,对图像进行倾斜校正是很必要的。PSA是近年来新出现的气体检测传感器,对PSA图像的倾斜校正大都通过手动校正的方法,已知文献中还未提有关PSA图像自动倾斜校正算法。由于PSA图像与微阵列图像有一定的相似性,可参考微阵列图像倾斜校正算法,但是在阵列点的形状、大小及分布和颜色特征的提取等方面,PSA图像与微阵列图像有很大的不同,需要针对PSA图像设计出新的倾斜校正算法。在已知文献中提及的有关微阵列的自动倾斜校正算法有基于radon变换的校正算法^[13]、基于功率谱的校正算法^[14]等。Radon变换的方法是通过图像进行不同角度的投影变换来求得倾斜角度的,对于PSA图像,易受咻点形状、大小及图像噪声干扰,可能出现错误的校正结果;而功率谱估计的方法,计算的每一步都需要傅里叶变换,计算量很大,且易受到频域噪声干扰。针对以上问题,设计了一种基于Radon变换与功率谱结合的PSA图像自动校正算法。该算法解决了单纯的radon变换法和功率谱的不足,能够快速准确的实现PSA图像的自动校正。

1 算法的设计

PSA图像的自动校正算法的流程如图1所示。从中图可以看出,算法包括两个阶段。第一阶段是对PSA图像进行预处理操作,包括灰度变换、形态学滤波、对比度增强和边缘的提取。此阶段是获得只含有咻阵列点边缘的二值形态学边缘图像。第二阶段是倾斜角度的求取操作,该步骤是利用radon变换和功率谱级联的方法对二值形态学边界图像进行各旋转角的估计,从而得到图像中咻点阵列的倾斜角度。利用得到的倾斜角度对原始图像进行旋转就可以得到校正后的图像。

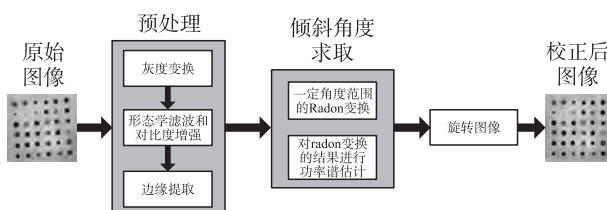


图1 算法流程图

1.1 预处理

预处理的目的是获得二值形态学边界图像,利用此图像参与第二阶段的倾斜角度的求取运算,不

仅大大降低了运算的花费,也消除了图像中噪声对后续运算的影响。

1.1.1 灰度变换

在PSA图像中,咻点颜色RGB值较小,为了增大咻点与背景图像的差异,灰度化处理算法采用了最小值法,即使R、G、B都等于他们中的最小者,公式如下:

$$Gray(x, y) = R = G = B = \min(R, G, B) \quad (1)$$

采用最小值法进行灰度化处理的结果如图2(b)所示。采用最小值法能够增强咻点与背景的对比度,有利于后续图像处理。

1.1.2 滤波和增强对比度

形态学^[15]滤波是一种非线性滤波方法,它利用不同结构元素形态学的开闭运算,来实现对图像进行滤波操作。形态学的开运算会去掉图像上与结构元素的形态下不相吻合的相对亮的分布结构,同时保留那些相吻合的部分;闭运算则会填充那些图像上与结构元素不相吻合的相对暗的分布结构,同时保留那些相吻合的部分。本文采用的是开闭运算级联的方法来实现图像的滤波,既能滤除噪声干扰又能保留咻点的信息。

设图像为 $I(x, y)$,结构元素为 $B(s, t)$,则用结构元素 B 对图像 I 进行形态学开闭运算的表达式如下:

$$I \circ B = (I \ominus B) \oplus B \quad (2)$$

$$I \cdot B = (I \oplus B) \ominus B \quad (3)$$

由于图像中咻点近于圆形,而噪声干扰信号是不规则的线性,因此算法采用的是圆形的结构元素,处理结果如图2(c)所示。

由于形态学中高帽变换反应图像中灰度的峰值信息,而低帽变换反应图像中灰度的谷值信息,因此级联高帽变换和低帽变换能够增加咻点和背景信息的对比度,其表达式如下:

$$H_{\text{top-hat}} = I - (I \cdot B) \quad (4)$$

$$H_{\text{bot-hat}} = (I \cdot B) - I \quad (5)$$

高低帽变换后的图像如图2(d)所示,从图中可以看出咻点与背景信息的对比度增强了,这使得后续的二值形态学边缘的提取更好的效果。

1.1.3 形态学边缘提取

对PSA图像进行形态学边缘提取之初,还需对图像进行二值化。对上述处理后的图像进行二值化,是采用自适应阈值分割的方法,此方法可以把大部分阵列咻点分割出来。自适应阈值的选取步骤如下:

①选择初始阈值 u_0 ,通常 u_0 为图像中最大灰

度值与最小灰度值的均值。

②用 u_0 把图像像素点分成两组,灰度值大于 u_0 的组 G_1 和灰度值不超过 u_0 的组 G_2 。

③分别计算 G_1 和 G_2 两组像素点灰度值的均值 u_1 和 u_2 ,并用下式计算新的阈值 u :

$$u = \frac{1}{2}(u_1 + u_2) \quad (6)$$

④比较 u 和 u_0 的差值是否小于指定阈值 T (本文 T 取值为 2),若是则 $u_0 = u$ 即是自适应最佳阈值,若否,则 $u_0 = u$,转 2。

通过上述步骤选取自适应阈值 u_0 ,对图像进行二值化,得到如图 2(e) 所示二值图像(其中吡啉点区域像素值为 1,背景为 0)。

对二值图像进行形态学边缘检测,可以得到只含吡啉点边缘的图像,形态学边界是二值图像的膨胀结果与腐蚀结果之差。设二值图像为 I ,结构元素为 B ,形态学边界图像 E 表达式如下:

$$E = (I \oplus B) - (I \ominus B) \quad (7)$$

形态学边界图像如图 2(f) 所示,图像中只有边缘的像素值为 1,其余都为 0,用其参与后续运算,大大提高了运算的效率。

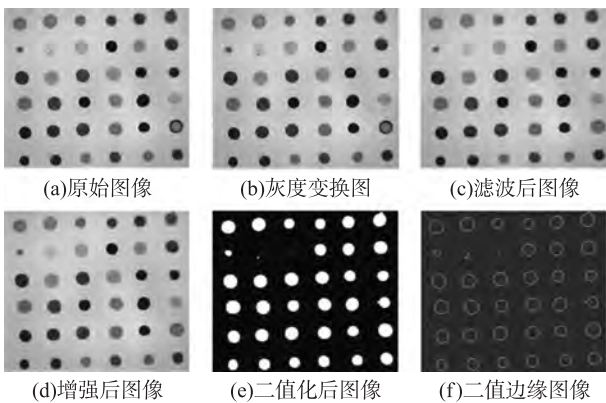


图2 预处理结果图

1.2 倾斜角度的求取

通过对 PSA 图像预处理,得到二值形态学边缘图像,倾斜角度的求取就是以此图像为输入信息,进行 radon 变换和功率谱估计,进而得到倾斜角度。

对图像在不同方向上的投影的函数即是 radon 变换,radon 变换^[16]用来计算图像在不同角度下的投影值,它将图像影射到投影空间。二维图像 $I(x, y)$ 的 Radon 变换的定义如下:

$$R_\theta(x') = \iint I(x, y) \delta(x \cos \theta + y \sin \theta - x') dx dy \quad (8)$$

其中 δ 为单位脉冲函数,结果年当中 x' 是不同的坐标位置, θ 是旋转角度。

从公式中可以看出,对图像的 radon 变换实际上

就是计算旋转角度方向上的投影的积分值。根据 PSA 图像的特征可以知道,在准直方向上,各位置投影值累加应达到最大值。由于采集的 PSA 图像仅有很小角度的倾斜,因此,本文仅在 $-5^\circ \sim 5^\circ$ 范围内利用式(8)对二值形态学边缘图像进行 radon 变换,其中 θ 变化的步长设为 0.01° ,变换的结果如图 3(a) 所示。

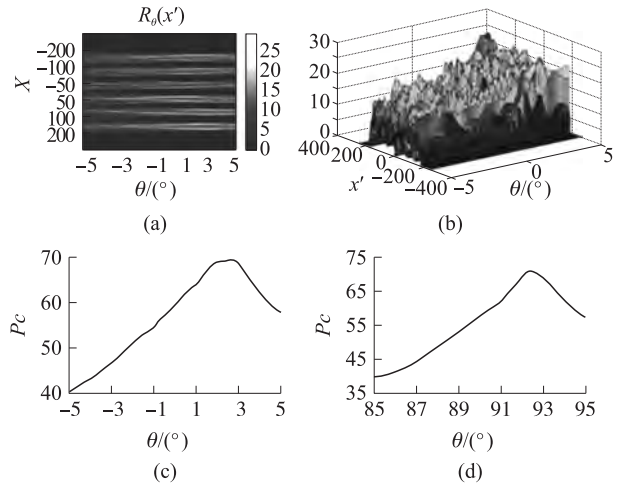


图3 radon 变换与功率谱累级联的过程图

X 轴表示投影的方向角 θ , Y 轴表示投影的位置,色彩表示投影值,为了易于观察,radon 变换后的三维表示如图 3(b) 所示。由于阵列芯片加工的关系,使得吡啉点的大小不一,形状也不是严格的圆形,可能出现 radon 变换在角度方向上的累加值的最大值所对应的旋转角度不是图像的倾斜角度的情况,使得倾斜角度的求取的准确度受到很大的影响。因此,为了更加准确的得到偏转角度,本文对 radon 变换后投影值进行了按位置的功率谱估计运算,在频域上求得各投影方向上功率谱的累加值,功率谱估计定义如下:

$$P(k, \theta) = \frac{1}{N} |DFT(R_\theta(x'))|^2 \quad (9)$$

其中

$$DFT(R_\theta(x')) = \sum_{x'=1}^N R_\theta(x') \exp\left(-j \frac{2\pi}{N} x' k\right) \quad k = 1, 2, \dots, N。$$

在投影方向上功率谱累加按下式计算:

$$P_c(\theta) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N P(k, \theta) \quad (10)$$

根据式(9)、式(10)求得的功率谱累加值如图 3(c) 所示, X 轴表示投影方向角 θ , Y 轴表示功率谱累加值,其只含有一个极大值,也就是 $P_c(\theta)$ 的最大值,此值所对应的投影方向就是阵列图像的准直方向。

为了更加准确的计算图像的偏转角度,本文分

别在水平和垂直两个方向上按上述步骤在 $-5^\circ \sim 5^\circ$ 的角度范围内进行搜索,其得到的功率谱累加值随角度变化的图如图3(c)和(d)所示,水平方向上和垂直方向上得到的倾斜角分别为 2.46° 和 2.50° ,用它们的均值作为倾斜角度对原始图像进行校正。

2 实验结果及分析

为了验证本文所设计的算法的效率和精度,对准直PSA图像手动逆时针旋转一定的角度($\theta_0 = 2.5^\circ$),作为待校正的图像,如图4(a)所示。实验分别用以下三种方法对待校正的图像进行自动校正(搜索步长为 0.01°):radon变换的方法、功率谱估计的方法和本文设计的方法。三种算法在matlab平台下进行了实验验证,他们校正后的结果图如图4(b)、(c)、(d)所示,倾斜校正的详细信息如表1所示。

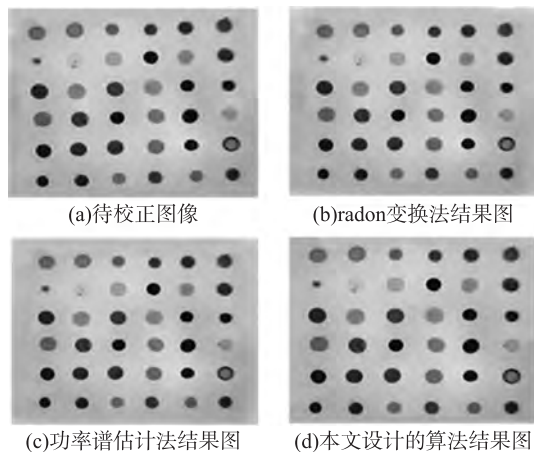


图4 三种算法的校正结果

表1 三种方法对图像进行自动倾斜校正的结果
($\theta_0 = 2.5^\circ$,步长为 0.01°)

算法	倾斜角度/ $(^\circ)$	误差	计算花费/s
Radon变换法	2.24	10.4%	0.429818
功率谱法	2.30	8%	1.268542
本文方法	2.52	0.8%	0.855660

从表中可以看出 radon 变换的方法精度不高,而使用功率谱估计的方法精度相比于 radon 变换有所提高,但是计算花费太大。本文设计的方法不仅精度高,而且大大降低了计算的花费,此算法的输入信息为阵列图像中吡啉点的二值形态学边缘的像素信息,可使得运算次数大大降低,同时也去除了图像中非吡啉点像素信息的干扰,倾斜角度的求取是利用 radon 变换和功率谱级联的方法,使空域和频域相结合,弥补了 radon 变换法校准结果不稳定现象,使得误差进一步减小。

为了验证本文设计的算法在整个角度搜索范围

内对 PSA 图像进行倾斜校正的稳定性,实验对准直图像在 $-5^\circ \sim 5^\circ$ 范围内,每隔 1° 手动进行旋转(逆时针为正),得到10幅待校正的图像。用三种算法对此10幅待校正图像进行自动校准,得到的倾斜角度与旋转角度的关系如图5所示,X轴表示旋转角度,Y轴表示求取的倾斜角度。从图5可以看出在 $-5^\circ \sim 5^\circ$ 的角度范围内,本算法得到的倾斜角度相比于其他两种算法有更好的稳定性和更高的精度。

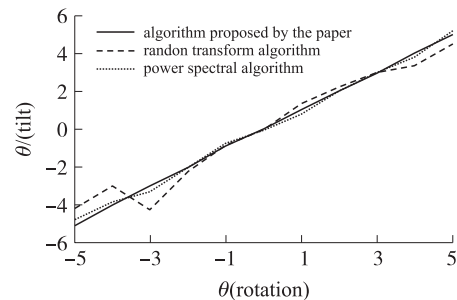


图5 三种算法求得10幅倾斜图像的倾斜角度结果

本文设计的算法已经成功移植到嵌入式系统中,利用本实验室自主研发的嵌入式毒气检测系统采集多幅PSA图像,此算法对其进行校正都取得了很好的效果。图6是利用本算法对实验采集的PSA图像进行倾斜校正的结果图,其求得的倾斜角度为 2.48° ,从图中可以看出,本算法能够快速准确的对PSA图像进行自动校正。

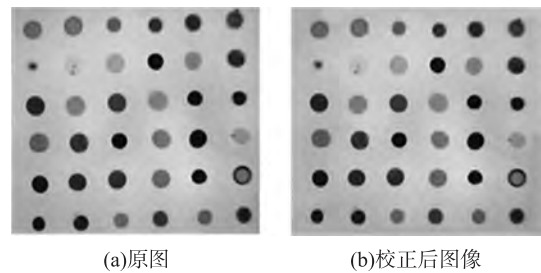


图6 本文设计的算法对测试图像倾斜校正结果

3 总结

针对PSA图像,本文设计了一种新型的自动校正的算法。该算法首先对图像进行边预处理得到只含吡啉点二值形态学的边缘信息的图像,再利用radon变换与功率谱级联的方法来求得倾斜角度。与其他算法相比,本算校正的精度高,并且计算花费很小。实验表明该算法对PSA图像能够快速准确的实现倾斜校正。同时,本算法还适用于其他阵列图像的自动校正(如DNA微阵列图像等)。

参考文献:

- [1] Cotte R I, Justes D R, Nanita S C, et al. Analysis of Gaseous Toxic

- Industrial Compounds and Chemical Warfare Agent Simulants by Atmospheric Pressure Ionization Mass Spectrometry [J]. *The Analyst*, 2006, 131(4): 579-589.
- [2] 吴玉锋, 田彦文, 韩元山. 气体传感器研究进展与发展方向[J]. *计算机测量与控制*, 2003, 11(10): 731-734.
- [3] Utriainen M, Karpanoja E, Paakkanen H. Combining Miniaturized Ion Mobility Spectrometer and Metal Oxide Gas Sensor for the Fast Detection of Toxic Chemical Vapors[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2003, 93(1-3): 17-24.
- [4] Lim S H, Feng L, Kemling J W, et al. An Optoelectronic Nose for Detection of Toxic Gases[J]. *Nature Chemistry*, 2009, 1(7): 562-567.
- [5] Grate J W. Hydrogen-Bond Acidic Polymers for Chemical Vapor Sensing[J]. *Chemical Reviews*, 2008, 108(2): 726-745.
- [6] Kim P, Albarella J D, Carey J R, et al. Towards the Development of a Portable Device for the Monitoring of Gaseous Toxic Industrial Chemicals Based on a Chemical Sensor Array[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2008, 134(1): 307-312.
- [7] Sen A, Albarella J D, Carey J R, et al. Low-Cost Colorimetric Sensor for the Quantitative Detection of Gaseous Hydrogen Sulfide [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2008, 134(1): 234-237.
- [8] Janzen M C, Ponder J B, Bailey D P, et al. Colorimetric Sensor Arrays for Volatile Organic Compounds[J]. *Analytical Chemistry*, 2006, 78(11): 3591-3600.
- [9] 郭东敏, 杨建华, 李秉玺. 可视嗅觉系统分析与设计[J]. *传感技术学报*, 2006, 19(3): 562-568.
- [10] Rakow N A, Sen A, Janzen M C, et al. Molecular Recognition and Discrimination of Amines with a Colorimetric Array [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2005, 44(29): 4528-4532.
- [11] Hou C J, Yang L M, Huo D Q. Optical Detection of a Competitive Inhibitor of Immobilized Plant-Esterase [C]//2009 3rd International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering (ICBBE), Beijing: ICBBE, 2009. 23-27.
- [12] Huo D Q, Yang L M, Hou C J, et al. Molecular Interactions of Monosulfonate Tetraphenylporphyrin (TPPS1) and Meso-Tetra(4-Sulfonatophenyl) Porphyrin (TPPS) with Dimethyl Methylphosphonate (DMMP) [J]. *Spectrochimica Acta Part a—Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2009, 74(2): 336-343.
- [13] 刘艳, 张勇德. 含弱信号点阵图像自动网格划分[J]. *中国医学工程*, 2008, 16(3): 221-225.
- [14] Deng N, Duan H L. An Automatic and Power Spectra-Based Rotate Correcting Algorithm for Microarray Image [C]//Proceedings of the 2005 IEEE Engineering in Medicine and Biology 27th Annual Conference (IEEE EMBS), Shanghai: IEEE EMBS, 2005. 898-901.
- [15] 李红卫, 苑伟政, 叶芳. 基于数学形态学的微阵列芯片荧光图像处理与分析[J]. *传感技术学报*, 2007, 20(2): 338-342.
- [16] 宋一中, 贺安之. Radon变换的计算机模拟[J]. *光电子·激光*, 2006, 17(4): 484-487.



罗小刚(1974-),男,副教授,主要研究方向为生物医学传感器、生物医学信号处理方面, luosteel@163.com;



汪德暖(1986-),男,硕士,主要研究方向为嵌入式软件设计及图像处理算法研究, nuan@cqu.edu.cn.