

文章编号:1006-3080(2014)06-0746-06

# 一种新的边界提取算法及其在接触角测量中的应用

张 佩, 万永菁, 周又玲

(华东理工大学信息科学与工程学院, 上海 200237)

**摘要:**提出一种基于子图像邻域梯度信息度量的边界提取算法,通过构造邻域信息映射矩阵并利用矩阵梯度信息度量值提取图像目标的有效边界,详细阐述了应用本文算法实现劣质液滴图像的边界检测及接触角测量的方法与步骤。实验结果表明:本文算法能有效地提取劣质液滴图像的目标边界,完成液滴接触角的自动计算,接触角计算结果与人工计算结果基本一致。

**关键词:**接触角测量; 液滴图像; 边界提取; 邻域信息

**中图分类号:**TP391

**文献标志码:**A

## A New Boundary Extraction Algorithm and Its Application in the Contact Angle Measurement

ZHANG Pei, WAN Yong-jing, ZHOU You-ling

(School of Information Science and Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

**Abstract:** The paper proposed a boundary extraction algorithm based on sub-image neighborhood gradient information metrics. By constructing the neighborhood information mapping matrix and using the metric of matrix gradient information, the proposed algorithm extracted the effective border. The methods and procedures were analyzed for boundary detection and contact angle measurements of the image of poor droplet. Experimental results show that this algorithm can effectively extract the object boundaries of the image of poor droplet and achieve the automatic calculation of contact angle, whose results are consistent with the manual calculations.

**Key words:** contact angle measurement; droplet image; boundary extraction; neighborhood information

润湿性是材料表面所具有的特性,接触角是衡量润湿性的一个重要参数。常用的接触角测量方法是通过摄像头采集液滴成形过程的图像,利用图像分析技术求取接触角信息。有效提取正确的液滴边界是获得准确的接触角值的前提。然而,由于固体表面的材质特性不一、液滴的透光特性差异以及机械水平位置偏差等因素的影响,拍摄出的液滴图像

边界容易出现亮度不均、边界粗糙以及边界部分淹没在背景中的现象,形成劣质液滴图像,给液滴边界提取和接触角计算带来了困难。因此,为了得到准确的接触角值,必须先获取正确的液滴边界信息。

边界提取算法在图像处理中有着重要的作用,其目标是检测出灰度变化剧烈的区域,同时又能达到边界位置较精确的要求。常用的边缘检测算子包

收稿日期:2014-02-14

基金项目:国家自然科学基金(61371150)

作者简介:张 佩(1989-),女,安徽人,硕士生,研究方向为信号处理、数字图像处理。E-mail: 695058092@qq.com

通信联系人:万永菁,E-mail:wanyongjing@ecust.edu.cn

括 Roberts 算子、Sobel 算子、Kirsch 算子、Prewitt 算子和 Laplacian 算子等,许多研究者在此基础上进行了改进并提出了很多新的边缘检测方法,如改进的基于边界跟踪的边缘检测方法<sup>[1-4]</sup>、基于曲线拟合的边缘检测方法等<sup>[5-6]</sup>。文献[7]提出了一种将 Sobel 算子与软阈值小波去噪结合的边缘检测算法,该算法改善了一般算法在去除椒盐噪声方面的缺陷,取得了更加明显的边缘检测效果。文献[8]提出了一种改进的基于小波的边缘检测算法,改善了传统小波算法对方向特性的不敏感性,得到了更加清晰的边界和更多细节信息。文献[5]提出了一种基于曲线拟合的子像素边缘检测算法,实验结果显示此算法具有高重复精度和较好的稳定性,可以有效抑制随机噪声的影响。文献[9]提出了一种基于边缘可靠性的固定阈值边缘检测法,用边界可靠性替代传统的边界高度来确定阈值,该算法可以更加稳定地检测出边缘点,有效避免了噪声的影响。

对于劣质液滴图像而言,不论液滴边界亮度是否均匀,对比度是否一致,均要求提取的液滴主边界信息必须完整且准确,液滴左、右端点必须出现在液滴边界内。对于劣质液滴图像,采用传统或改进的边界提取算法很难获取完整、正确的液滴边界。本文提出了一种基于子图像邻域梯度信息度量的液滴边界提取算法,通过构造邻域信息映射矩阵并利用矩阵梯度信息度量值有效提取出劣质液滴图像完

整、正确的边界。此外,本文阐述了液滴接触角的自动切线法的计算方法与实现步骤,采用本文算法可以快速、准确地计算出液滴左、右接触角信息。

## 1 液滴边界提取算法思想及实现步骤

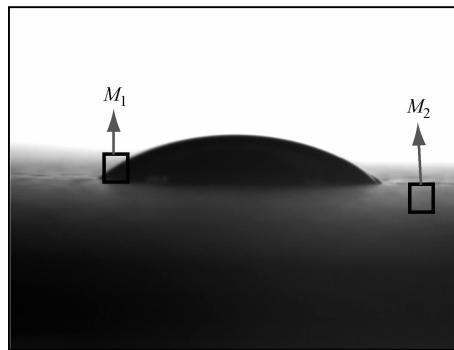
### 1.1 基于邻域梯度信息度量的液滴边界提取算法思想

1.1.1 构造邻域梯度信息映射矩阵  $\mathbf{EM}$  设液滴图像中某一点的像素值为  $G(i, j)$ ,其  $3 \times 3$  邻域的像素值用  $SB(i, j)$  表示,由式(1)构造邻域梯度信息映射矩阵  $\mathbf{EM}$ 。

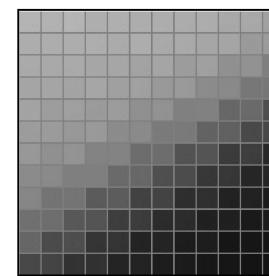
$$\mathbf{EM}(x, y) = \sum_{\forall(i, j) \in I} \{ [G(i, j) == x] \cap [GB(i, j) == y] \}, x, y \in [0, 255] \quad (1)$$

式中:  $GB(i, j) = \max(|SB(i, j) - G(i, j)|)$ 。邻域信息映射矩阵  $\mathbf{EM}(x, y)$  的具体含义是记录像点邻域梯度变化最大的跳变值,  $x$  为中心像点的灰度值,  $y$  为邻域变化最大的点的灰度值。

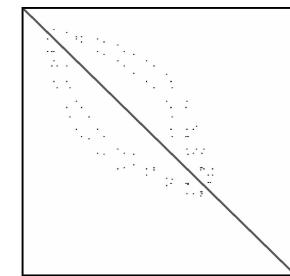
1.1.2 构造矩阵  $\mathbf{EM}$  映射图 将原始液滴图像分割成许多子图像块,每个子图像块的邻域信息映射矩阵  $\mathbf{EM}$  将反映子图像块中像点梯度变化情况。矩阵  $\mathbf{EM}$  映射图的标记方法为:如果  $\mathbf{EM}(x, y) = 0$ , 则此点标记为白色;若  $\mathbf{EM}(x, y) \neq 0$ , 则标记为黑色。图 1 所示为一幅液滴图像的局部子图像块所对应的邻域信息映射矩阵  $\mathbf{EM}(x, y)$  的映射图。



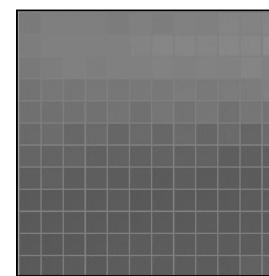
(a) Original droplet image



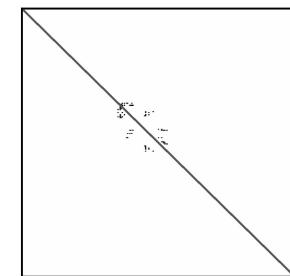
(b) Enlargement of  $M_1$



(c)  $\mathbf{EM}$  matrix map of  $M_1$



(d) Enlargement of  $M_2$



(e)  $\mathbf{EM}$  matrix map of  $M_2$

图 1 灰度较深图像的局部子图像及其  $\mathbf{EM}$  矩阵映射图

Fig. 1  $\mathbf{EM}$  matrix maps of partial sub-image in darker gray image

图 1(b) 和图 1(d) 为原始液滴图像中的两个子

图像块  $M_1$  和  $M_2$  对应的局部放大图。很明显,子图

像块  $M_1$  中包含液滴边界,而子图像块  $M_2$  不包含液滴边界。在两个子图像块对应的  $EM$  矩阵映射图中能够清晰地观察到两个子图像块具有不同的梯度特征分布,即在图 1(c)所示的映射图中, $EM$  矩阵映射值大多分布在离矩阵主对角线较远的位置,而在图 1(e)所示的映射图中,则大多分布在离矩阵主对角线很近的位置。

### 1.1.3 计算 $EM$ 矩阵映射图梯度信息度量值 $BL$

根据  $EM$  矩阵映射图的特征,提取其梯度信息度量值  $BL$ ,用于表征子图像块梯度信息量的大小,并由此判断子图像内是否存在液滴边界。

在  $EM$  矩阵映射图中,设点  $(x, y)$  与对角线之间的距离为  $d_{xy}$ 。

$$d_{xy} = \left| \frac{x - y}{\sqrt{2}} \right| \quad (2)$$

在  $EM$  矩阵映射图的每一条反对角线  $l_k$  ( $0 \leq k \leq 510$ ) 上,都可以找到一个跟主对角线距离最远的点,令第  $k$  条反对角线上的距离最大值为  $P_k$ 。

$$P_k = \max d_{xy}, (x, y) \in l_k \quad (3)$$

对所有  $P_k$  值进行求和运算,得到  $EM$  矩阵映射图的梯度信息量的总和  $P_s$ ,如式(4)所示。

$$P_s = \sum_{k=0}^{510} P_k, (i, j) \in l_k \quad (4)$$

在  $EM$  矩阵映射图中,当出现较多偏离主对角线的统计点时,即代表原液滴图像块中含有液滴边界,此时将获得较大的  $P_s$  值;反之,  $P_s$  值较小。为了方便获取归一化的  $EM$  矩阵梯度信息度量值  $BL$ ,计算  $P_s$  极限情况下的最大值,即当所有的  $EM$  映射值都出现最远离对角线的地方时,得到最大梯度信息总量值  $B_s$ ,如式(5)所示。

$$B_s = 2 \sum_{k=0}^{255} \frac{k}{\sqrt{2}}, k = 0, \dots, 255 \quad (5)$$

然后,由式(6)求解归一化的  $EM$  矩阵梯度信息度量值  $BL$ 。

$$BL = \frac{P_s}{B_s} \quad (6)$$

梯度信息度量值  $BL$  能有效反映出液滴子图像块的梯度信息。若  $BL$  值大于阈值  $t$ ,则认为区域内含有液滴边界;反之,则认为区域内没有液滴边界。

## 1.2 液滴边界提取算法实现步骤

基于邻域梯度信息度量的液滴边界提取算法实现步骤如下:

(1) 以原始液滴图像的  $(0, 0)$  为起点,将图像划分为  $W \times H$  大小的子图像块。

(2) 构造子图像块的  $EM$  矩阵,计算其梯度信

息度量  $BL$  值。当  $BL \leq t$  时,判定它的内部不包含边界信息,将子图像块标记为背景区域,保持其各像素点的灰度值不变;当  $BL > t$  时,标记子图像块为液滴边界区域。

(3) 对标记为液滴边界区域的子图像块用 FCM 算法进行聚类分割,聚类中心数为 2。浅色聚类值代表背景,深色聚类值代表液滴目标。判断被聚类为深色液滴目标点的邻域值,若其 8 邻域中含有浅色的背景点,则判定该点为边界点,将其标记为红色,表征该点为边界点。

(4) 采用滑动窗技术,以原始液滴图像的  $(\frac{W}{2}, \frac{H}{2})$  为起点,将图像重新划分为  $W \times H$  大小的子图像块。重新进行步骤(1)~步骤(3)的操作。

算法结束后,凡是曾经标记为红色边界点的值保留在原始液滴图像中,图像中红色标出的即为液滴的边界信息。

## 1.3 算法关键参数的选择

算法中,需要考虑选择的参数有两个:一个是子图像块的大小  $W \times H$ ;另一个是条件阈值  $t$ 。

本文中经摄像头采集的液滴图像大小为  $800 \times 600$ ,其中液滴部分一般情况下都占整幅图像的  $\frac{1}{4} \sim \frac{3}{4}$ 。依据经验,可选取子图像块的大小为液滴部分的  $\frac{1}{4} \sim \frac{1}{3}$ ,本文算法的子图像块大小为  $80 \times 60$ 。

本文选取了 200 幅液滴子图像,其中 100 幅为包含边界的液滴子图像,另 100 幅是不包含边界的子图像,分别构造每幅子图像的  $EM$  矩阵,计算其梯度信息度量值  $BL$ ,得到两类图像的  $BL$  值分布情况如图 2 所示。其中圆圈表示含边界的液滴子图像的  $BL$  值,加号表示不含边界的子图像的  $BL$  值。通过对不同类别图像的实验,本文选取阈值  $t =$

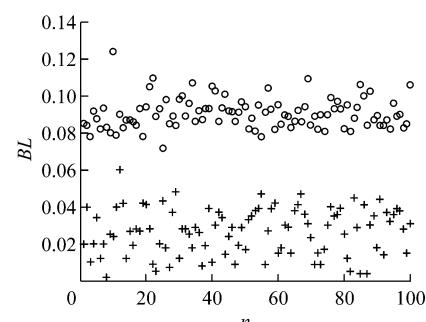


图 2 200 幅液滴子图像的  $BL$  值分布情况

Fig. 2  $BL$  value distribution of 200 droplet sub-images

0.07 完成液滴边界提取工作。

## 2 基于液滴主边界信息的接触角计算方法

### 2.1 液滴边界顶点与端点坐标的获取

本文采用文献[10]中的链码跟踪算法记录液滴边界坐标。液滴边界的顶点坐标为边界曲线中纵坐标最小的连续边界的中点, 记为( $C_x, C_y$ )。液滴边界端点出现在边界斜率的凸拐点或凹拐点处, 其位置与链码差曲线的转折点对应。本文计算液滴边界的三点链码和及链码差信息, 由液滴边界链码差曲线计算边界端点位置。液滴左端点坐标标记为( $L_x, L_y$ ), 右端点坐标标记为( $R_x, R_y$ )。

$$\left\{ \begin{array}{l} O_x = \frac{[(C_y - L_y)(M_y^2 - L_y^2 + M_x^2 - L_x^2) + (M_y - L_y)(L_y^2 - C_y^2 + L_x^2 - C_x^2)]}{2(M_x - L_x)(C_y - L_y) - 2(C_x - L_x)(M_y - L_y)} \\ O_y = \frac{[(C_x - L_x)(M_x^2 - L_x^2 + M_y^2 - L_y^2) + (M_x - L_x)(L_x^2 - C_x^2 + L_y^2 - C_y^2)]}{2(M_y - L_y)(C_x - L_x) - 2(C_y - L_y)(M_x - L_x)} \\ L_r = \sqrt{(L_x - O_x)^2 + (L_y - O_y)^2} \end{array} \right. \quad (8)$$

(3) 计算模拟左切圆与液滴真实边界的契合度。按式(9)计算模拟圆的边界与液滴真实边界的偏差值  $EL$ 。式中, ( $EL_x[i]$ ,  $EL_y[i]$ ) 为液滴边界上的点, ( $P_x[i]$ ,  $P_y[i]$ ) 为过圆心( $O_x, O_y$ ) 和点( $EL_x[i]$ ,  $EL_y[i]$ ) 的直线与左切圆相交的点的坐标, 其中  $i \in [0, L_{\text{num}} - 1]$ 。

$$EL = \frac{1}{L_{\text{num}}} \times \sum_{i=0}^{L_{\text{num}}-1} \sqrt{(EL_x[i] - P_x[i])^2 + (EL_y[i] - P_y[i])^2} \quad (9)$$

(4) 若偏差  $EL$  小于等于阈值  $s$ , 则认为该模拟切圆与原始液滴边界契合, 将此模拟切圆作为左切圆, 进行步骤(5)的左接触角计算; 如果偏差  $EL$  大于阈值  $s$ , 则认为该模拟切圆与原始液滴边界不契合, 则按式(10)调整液滴边界的切圆搜索范围, 修正左边界点长度信息  $L_{\text{num}}$ , 重新进行左切圆的求取。

$$L_{\text{num}} = (1 - k\beta) \times LS \quad (10)$$

式中:  $k$  为调整次数;  $\beta$  为调整步长。边界搜索步长的调整量一般取初始边界长度  $LS$  的  $\frac{1}{5} \sim \frac{1}{20}$  为宜,

本文取  $\beta = \frac{1}{10}$ 。阈值  $s$  表示模拟切圆的边界与液滴边界的平均偏差, 一般设为  $1 \sim 3$ , 阈值过大容易得到不准确的切圆, 阈值过小则易增加算法的计算次

### 2.2 采用切线法计算液滴接触角

自动切线法的目标是寻找与液滴边界最契合的左、右边界切圆, 然后由切圆中心坐标及半径计算液滴左、右接触角值。以计算液滴左接触角为例, 采用切线法计算液滴左接触角的步骤如下:

(1) 左边界点的横、纵坐标记录在数组  $EL_x[i]$  和  $EL_y[i]$  中, 且满足式(7)。其中,  $i \in [0, L_{\text{num}} - 1]$ 。 $L_{\text{num}}$  为左边界点的长度, 为后续计算方便, 左边界点长度初值记录在  $LS$  中。

$$\left\{ \begin{array}{l} L_x = EL_x[0], L_y = EL_y[0] \\ C_x = EL_x[L_{\text{num}} - 1], C_y = EL_y[L_{\text{num}} - 1] \end{array} \right. \quad (7)$$

(2) 计算左边界段的中点坐标值, 记为( $M_x, M_y$ )。以边界顶点、左端点及左边界中点作为模拟左切圆的 3 个点, 由式(8)计算左切圆的半径  $L_r$  及圆心位置( $O_x, O_y$ )。

数, 使程序效率降低。本文取值阈值  $s$  为 1.5。若  $L_{\text{num}} \leq 0$  应停止搜索, 此时在所有的切圆中寻找偏差值  $EL$  最小的切圆作为左切圆。

(5) 按式(11)计算左接触角  $\theta_L$ 。

$$\theta_L = \arctg \left( \frac{\sqrt{(C_x - O_x)^2 + (C_y - O_y)^2}}{L_r} \right) \quad (11)$$

采用上述步骤, 即可完成液滴接触角的自动计算。液滴右接触角的计算与左接触角的计算方法基本一致。

## 3 实验结果与分析

本文对静态和动态液滴图像进行了算法验证。图 3 中示出了 4 幅静态原始液滴图像, 其中图 3(a)为优质液滴图像, 图 3(b)~图 3(d)为劣质液滴图像。劣质液滴图像中, 图 3(b)存在液滴水平位置偏差现象, 图 3(c)和图 3(d)存在液滴边界亮度分布不均和水平面粗糙的现象。对于存在液滴水平位置偏差现象的液滴而言, 容易将过高的水平面误判为液滴边界; 对于存在液滴边界亮度分布不均和水平面粗糙现象的液滴而言, 较难获得连续完整的液滴边界, 容易造成液滴端点计算错误, 从而影响接触角计算的正确性。完整、连续的液滴边界必须包含整

个液滴上圆弧和左、右端点。图 3(e)~图 3(h)是采用本文算法提取的已标识出液滴边界信息的图像。从边界提取结果看,不论是优质液滴图像还是

劣质液滴图像,应用本文算法均可以获得完整、准确的液滴边界信息。

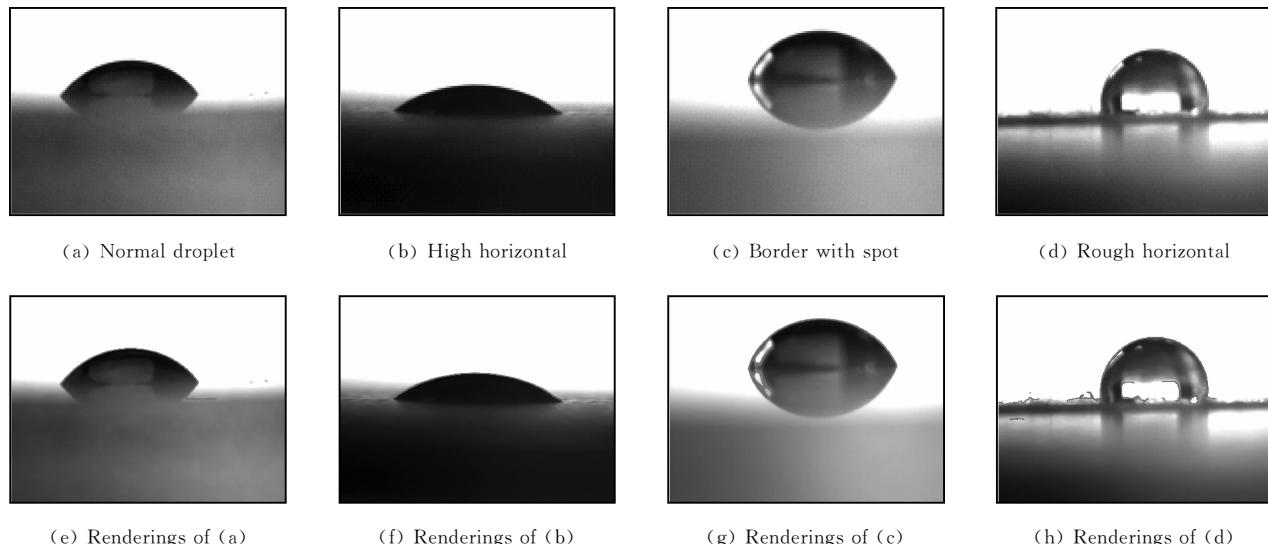


图 3 本文算法的边界提取效果图

Fig. 3 Boundary extraction renderings using the proposed algorithm

采用自动切线法对图 3 中的 4 幅静态液滴进行接触角计算,获得其左、右切圆及接触角计算结果如图 4 所示。自动切线法与手动切线法的计算结果比较如表 1 所示。

从接触角计算结果可以看出,采用本文算法得

到的液滴接触角与手动计算出的结果基本一致,误差不超过 1%。实验表明,采用本文的液滴边界提取算法和接触角计算方法,能自动、有效地完成液滴接触角的计算。

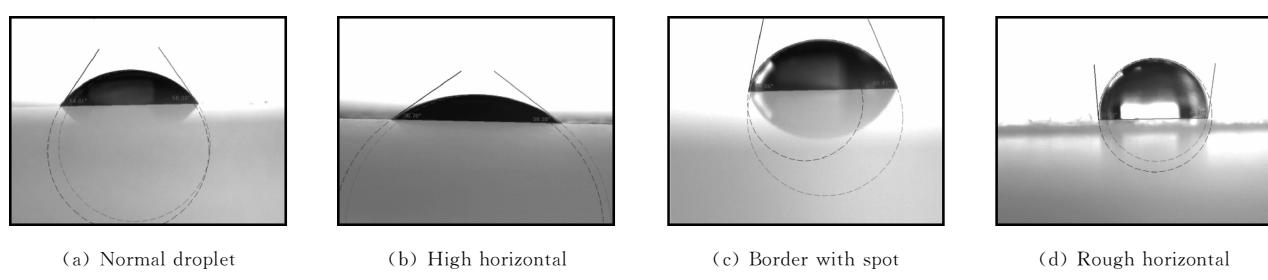


图 4 自动切线法下左、右切圆及接触角计算结果图

Fig. 4 Left and right tangentially and the contact angle calculate results by auto tangent method

表 1 自动切线法与手动切线法的接触角计算结果比较

Table 1 Comparison between the manual and automatic method of tangent method

Image	$\theta_L/(\circ)$		Error of left/%	$\theta_R/(\circ)$		Error of right/%
	Manual	Automatic		Manual	Automatic	
Fig. 3(a)	55.03	54.81	0.40	56.35	56.38	0.01
Fig. 3(b)	35.50	35.70	0.56	36.23	36.38	0.41
Fig. 3(c)	76.87	77.06	0.25	68.07	68.41	0.50
Fig. 3(d)	94.07	93.53	0.57	100.02	99.16	0.86

图 5 所示为一组动态液滴原始图像,图像总数量为 42 幅。该组图像记录了一个液滴由水平位置至倾斜位置时液滴接触角的变化过程。要求接触角

检测系统在采集到 42 幅液滴图像后,能批量自动完成左、右接触角的计算。

针对每幅液滴图像,先用本文提出的液滴边

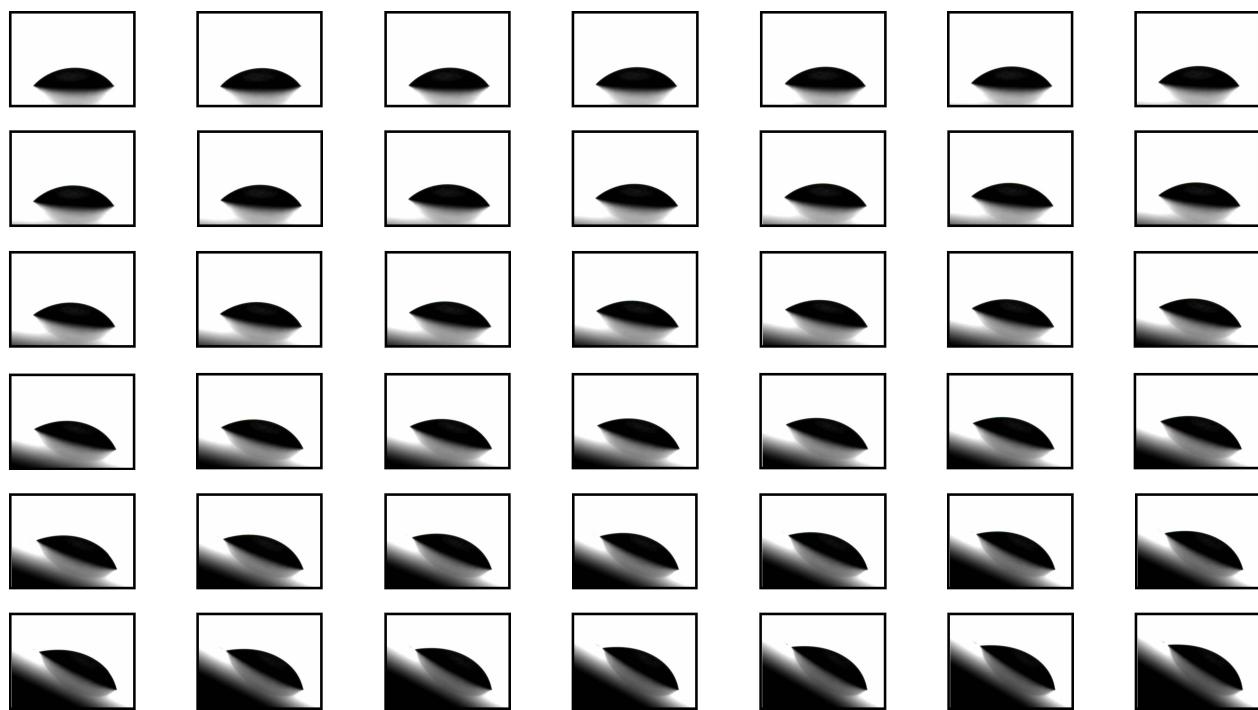


图 5 动态液滴图像

Fig. 5 Formation of tilt droplets

界提取算法提取液滴边界,然后用自动切线法计算液滴左、右接触角值,完成接触角检测系统的批量自动识别和计算功能,获得所有 42 幅液滴图像的左、右接触角信息。液滴左、右接触角的自动测量结果与手动测量结果对比如图 6 所示。图中,横坐标代表图像的序号,纵坐标为左、右接触角的值。由图 6

看出,采用本文算法得到了与手动计算近似的左、右接触角值,实验结果统计表明,对于动态液滴图像,采用手动和自动计算方法得到的左、右接触角值的偏差不超过 3%。实验表明,采用本文算法不仅能准确计算出左、右接触角值,还能对动态图像进行批量处理,可以有效提高接触角检测与计算的效率。

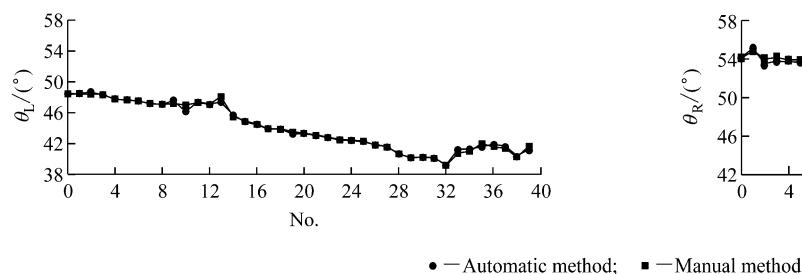


图 6 倾斜液滴左、右接触角的手动法与自动法比较

Fig. 6 Comparison of manual method and Automatic method of tilt droplet images

## 4 结束语

提出了一种基于邻域梯度信息度量的液滴边界提取算法。首先构造子图像邻域梯度信息映射矩阵  $EM$ ,并由  $EM$  矩阵的映射图计算梯度信息度量值  $BL$ ,并由此判断子图像区域是否存在液滴边界。用本文算法能够有效提取液滴主边界,即便对于劣质液滴图像而言,也能获得完整且准确的液滴边界,为

后续液滴接触角值的计算奠定了良好的基础。此外,本文阐述了液滴接触角的自动切线法的计算方法和实现步骤,对优质和劣质的静态液滴图像及一组动态液滴图像分别进行了实验。结果表明,用本文算法不仅可获得液滴的准确边界,而且能够对液滴接触角进行自动计算,计算结果与手动计算结果基本一致,提高了液滴接触角检测系统的效率。

(下转第 762 页)