

基于光栅投影序列图像融合的倾斜校正算法

刘旭*, 巫玲, 陈念年, 范勇, 段晶晶, 任新宇, 夏菁菁

(西南科技大学 计算机科学与技术学院, 四川 绵阳 621010)

(* 通信作者电子邮箱 454724394@qq.com)

摘要:针对现有校正算法因抖动等因素存在的校正误差问题,提出了一种基于光栅投影的倾斜校正算法。通过分析连续频率变化的条纹图像序列,构建像素点位置与像素斜率的转换模型;然后利用光栅图像倾斜角度与像素斜率变化关系,使用三角法计算出倾斜角;最后实现倾斜校正。实验结果表明,该算法可有效检测出 $[-90^\circ, 90^\circ]$ 范围内的倾斜角度,准确率为99%。与现有的Hough变换等倾斜校正算法相比,所提算法检测精确度、准确率明显提高。

关键词:光栅投影;倾斜校正;Hough变换;最小二乘法;像素斜率

中图分类号: TP391.413 **文献标志码:** A

Tilt correction algorithm based on aggregation of grating projection sequences

LIU Xu*, WU Ling, CHEN Niannian, FAN Yong, DUAN Jingjing, REN Xinyu, XIA Jingjing

(School of Computer Science and Technology, Southwest University of Science and Technology, Mianyang Sichuan 621010, China)

Abstract: In view of the correction error problem which is caused by some factors such as dithering, the authors presented a new optical tilt correction method based on grating projection. The method was based on the analysis of each pixel of the data array in a sequence of fringe patterns having multiple frequencies, and setup model for pixel coordinates and pixel-slope. Then skew angles of fringes were calculated by trigonometry with the relationship between tilt angle and pixel-slope. At last, tilt correction was realized. The experimental results show that, the algorithm is capable of accurately detecting angle within the range $[-90^\circ, 90^\circ]$, accuracy is 99%. Compared with other algorithms such as Hough transform, the proposed algorithm improves precision and accuracy significantly.

Key words: grating projection; tilt correction; Hough transform; least square method; pixel slope

0 引言

光栅投影三维轮廓测量法就是将光栅图像投影到待测物表面,由摄像机获取变形的的光栅图像,并由形变量与高度的关系来确定出轮廓相对参考平面的高度信息^[1-3]。根据形变量与高度关系的不同描述方法以及对光栅条纹不同的处理方式,传统的光栅投影测量方法可以大致分直接三角法和相位测量法两种^[1]。前者原理简单、速度快、不易受到干扰,但是其精度不如相位测量法高,不能实现全场测量。后者在相位展开时,易受噪声干扰,且要求图像数据连续,对于表面存在立方等陡变物体及噪声较大的图像,在解相位时就会存在较大的误差,造成三维信息恢复精度不高^[4]。为了避免相位展开过程中的误差传播效应,Huntley等^[5]提出了时间相位展开方法,实现各像素点相互独立的相位展开,避免了空间相位展开中误差传播的发生。Chan^[6]对此提出了改进的算法,在时间相位展开法思想上,实现一种无需相位展开的光栅投影测量方法,不需要计算截断相位,不依赖展开路径计算绝对相位。该算法不要求相位数据连续,仅依赖于像素点在时间维

度上的灰度值变化。然而倾斜的图像会影响像素点在时间维度的灰度值,因此为了提高该算法测量精度,需要采集的对光栅图像进行倾斜校正的预处理操作。

倾斜校正是图像预处理中非常关键的一步,它是把倾斜图像绕其质心沿着倾斜反方向旋转一个角度的旋转变换。因此,怎样获取倾斜角度大小就成了倾斜校正的关键。其中最典型是以下两类方法:Hough变换法^[7-9]和投影法^[10-11]。Hough变换法的基本思想是把图像平面上的点对应到参数平面上的线,通过累加统计来得到倾斜角。由于算法是对图像中的每个像素进行运算,因此算法的时间复杂度较高,处理速度依然较慢。投影法的基本思路是计算每个倾斜角度的投影形状,将其定义成为一个目标函数,实际倾斜角度就是使目标函数最优^[12]。这种方法需要计算每个倾斜角度的投影形状,要使得倾斜估计精度较高,计算量非常大。

针对现有Hough变换法、投影法等倾斜校正算法,存在计算量大、精度不高、因抖动等不可预计环境因素引起的校正误差等问题,本文提出一种基于主动式光栅投影的图像序列融合的倾斜校正算法,通过条纹图像,建立像素位置与像素斜率

收稿日期: 2013-06-03; **修回日期:** 2013-07-21。 **基金项目:** 四川省科技创新苗子工程资助项目(2012ZZ070); 制造过程测试技术—省部共建教育部重点实验室(西南科技大学)开放基金资助项目(12zxzk6); 西南科技大学研究生创新基金资助项目(13ycj41)。

作者简介: 刘旭(1989-),女,四川资阳人,硕士研究生,主要研究方向:机器视觉测量、图像处理; 巫玲(1982-),女,四川遂宁人,讲师,硕士,主要研究方向:视觉测量、图像分割; 陈念年(1977-),男,四川汉源人,副教授,硕士,主要研究方向:机器视觉、图像处理; 范勇(1972-),男,重庆忠县人,教授,博士,主要研究方向:机器视觉、图像理解; 段晶晶(1989-),女,河南驻马店人,硕士研究生,主要研究方向:机器视觉; 任新宇(1988-),男,四川泸州人,硕士研究生,主要研究方向:机器视觉; 夏菁菁(1987-),女,四川广安人,硕士研究生,主要研究方向:机器视觉。

模型,最终计算得到条纹图像的倾斜角度。

1 基于光栅投影的倾斜校正算法

1.1 光栅投影

基于光栅投影序列图像融合的倾斜校正算法是将竖直的光栅条纹序列图像,如图 1 所示,投影到物体表面,然后用固体摄像器件^[13] CCD (Charge Coupled Device) 采集得到物体表面的条纹图像,通过分析条纹的倾斜角度来进行倾斜校正。投影光栅为:

$$I(x, y) = 1 + \cos\left(\frac{2\pi}{P + (n - 1)C}\right)x \quad (1)$$

其中: P 表示第一帧光栅图像条纹的宽度, n 表示图像帧序列号 ($n = 1, 2, \dots, N$, N 表示光栅图像序列总数), C 表示每帧图像条纹变化宽度。

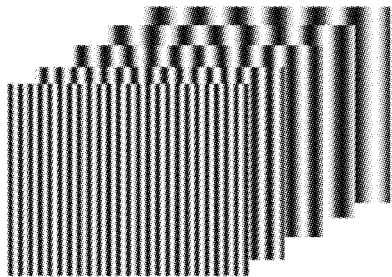


图 1 一组投影光栅序列图像

本文利用采集的光栅序列上像素点的亮度数据,获取其累积变化周期和对应的图像频率,使用最小二乘法^[14-15]对两者进行拟合直线得到光栅投影中的点像素斜率;接着取同行多个点像素斜率倒数与点像素所在水平位置进行二次最小二乘拟合直线,得到行像素斜率;最后利用点、行像素斜率与像素点坐标位置关系计算得到倾斜角度 θ ,反向旋转 θ 完成对条纹图像的校正。其流程如图 2。

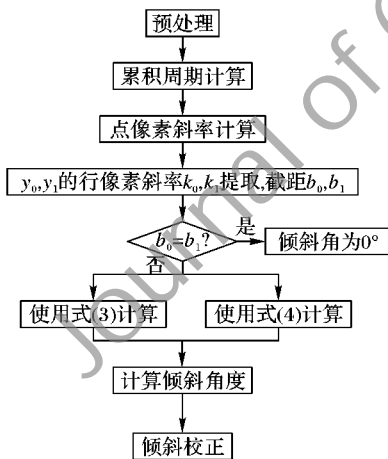


图 2 算法流程

1.2 光栅投影中的点像素斜率

光栅投影中的点像素斜率是指用最小二乘法拟合对光栅图像序列上同一像素点亮度变化的累积周期(极值)个数与取得极值的光栅图像对应的频率两组数据进行拟合直线得到的斜率。图 3 中纵坐标为像素点 $p(x, y)$ 在光栅图像序列上像素点的亮度值变化,横坐标为光栅图像序列号,标注符号“○”的点为极值点。图 4 中纵坐标为图 3 取得极值对应的光栅条纹的频率,横坐标为对应极值个数,直线的斜率就是光栅投影中的点像素斜率。

单帧光栅图像的频率为 $\frac{2\pi}{P + (n - 1)C}$, 图像的周期大小为 $T = P + (n - 1)C$ 。在图 3 上, N_k 为第 n 帧光栅图像灰度变化取得的周期个数, n_0, n_1 为第 n 帧前后两个连续取得极小、极大值的光栅图像的序号, x 为像素点 p 在光栅图像水平方向的坐标, T_i, T_j 为两帧光栅条纹图像对应的周期, 则有:

$$\begin{cases} (N_k + 1/4)T_i = x \\ (N_k - 1/4)T_j = x \end{cases} \quad (2)$$

根据点像素斜率及投影光栅的定义,得到像素点 p 的点像素斜率:

$$k_p = -2\pi(1/T_i - 1/T_j) = -\pi/x \quad (3)$$

式(3)表明对于一组光栅图像,点像素斜率与像素点在图像纵坐标位置 y 无关,只与其横坐标位置 x 相关。

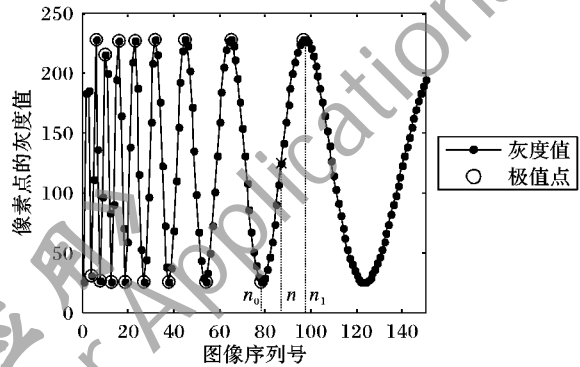


图 3 像素点 $p(x, y)$ 在图像序列上灰度变化

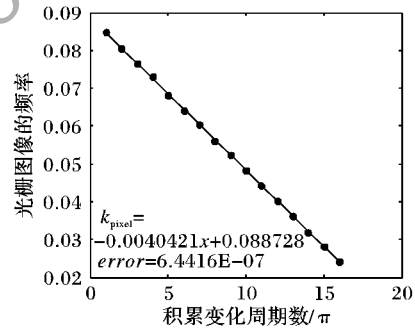


图 4 点像素斜率

1.3 光栅投影中的行像素斜率

在光栅图像的某一行 y 上取水平坐标值为 x_0, x_1, \dots, x_n 的采样像素点 $p_0(y, x_0) p_1(y, x_1) \dots p_n(y, x_n)$ 。用最小二乘法对采样像素点的点像素斜率的倒数 $1/k_p$ 与点像素的水平坐标值两组数据进行拟合直线,计算出的直线斜率就是光栅投影中的行像素斜率。图 5 中纵坐标为第 781 行的采样像素点的点像素斜率的倒数,横坐标为采样像素点所在的图像水平方向的位置,而直线的斜率就是光栅投影中的行像素斜率。

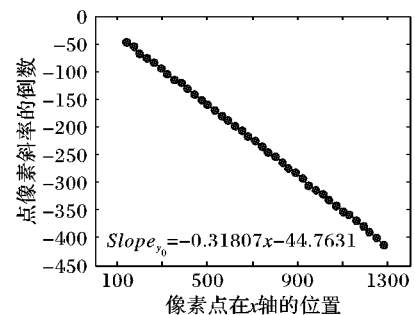


图 5 光栅图像第 781 行的行像素斜率

设拟合得到的行像素斜率为 k_y , 截距为 b_y , 则有:

$$\begin{cases} k_y = \frac{-\frac{x_i - x_0}{\pi} - \left(-\frac{x_j - x_0}{\pi}\right)}{x_i - x_j} = -\frac{1}{\pi} \\ b_y = -\frac{x_0}{\pi} \end{cases} \quad (4)$$

其中 x_0 为起始像素,由式(4)可以看出行像素斜率是定值 $-1/\pi$,截距与行起始像素 x_0 有关。

1.4 倾斜校正算法

对于一组理想无倾斜角度的光栅图像,取任意两行 y_0 、 y_1 , $|y_0 - y_1|$ 为两行的行间距,从同一起始点 x_0 开始,分别计算两行的行像素斜率,由式(4)知,这两行取得的行像素斜率相同,截距也相同。

如果实际结果中求取到两行的行像素斜率和截距值均不相同,说明光栅条纹有一定的倾斜。利用式(3)计算与 y_0 的像素点 $P_{00}(y_0, x_0)P_{01}(y_0, x_1) \dots P_{0n}(y_0, x_n)$ 取得相同点像素斜率的 y_1 行,其真实像素点 $P_{10}'(y_1, x_0)P_{11}'(y_1, x_1) \dots P_{1n}'(y_1, x_n)$,如图 6 所示。

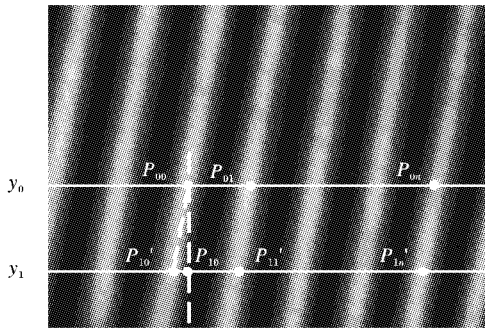


图 6 用式(3)计算像素点坐标偏移的校正方法

对于 y_0, y_1 两行的第一个采样点,在直角 $\Delta P_{10}'P_{10}P_{00}$ 上,有:

$$\tan \angle P_{10}'P_{00}P_{10} = \frac{P_{10}'P_{10}}{P_{10}P_{00}} \quad (5)$$

其中: $P_{10}P_{00}$ 为两行行间距 $P_{10}P_{00} = y_1 - y_0$, $P_{10}'P_{10}$ 为像素点坐标的偏移, $P_{10}'P_{10} = x_0 - x_0'$ 。

对 y_0, y_1 两行的所有采样点,设 $\beta_i = \angle P_{1i}'P_{0i}P_{1i}$ ($i = 0, 1, 2, \dots, n, n$ 为采样点个数),则有:

$$\tan \beta_i = \frac{x_i - x_i'}{y_0 - y_1} \quad (6)$$

通过反正切函数就可以求出 β_i , β_i 的平均值 $\bar{\beta}$ 就是条纹图像的倾斜角度。

$$\bar{\beta} = \frac{1}{n+1} \sum_{i=0}^n \beta_i \quad (7)$$

同理可以计算多行 y_0, y_1, \dots, y_n 行像素斜率,使用式(4)计算与 y_0 行从同一起始点 x_0 对应的真实起始点。根据这些真实起始点坐标值和行间距值,使用最小二乘拟合计算出条纹倾斜角度,如图 7 所示。

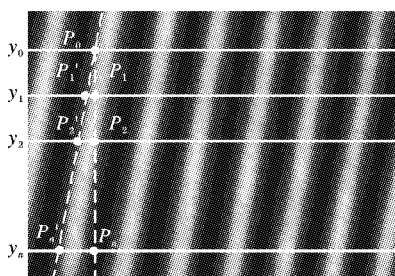


图 7 用式(4)计算真实起始像素的校正方法

2 实验与讨论

为了检验算法有效性及准确性,在具有良好的封闭性,受自然光源、噪声影响小的环境下,使用一组连续频率变化的投影光栅图像(180 张图像),图像大小为 1280×1050 像素。其中投影光栅参数 $P = 68, N = 180, C = 2$ 。将其投影在物体表面,使用 Baumer 的 TXG12c 型 CCD 采集得到不同倾斜角度下的 300 组光栅图像序列。在 Matlab 2010a 下实现本文提出的倾斜校正算法,其中运行环境为 Pentium Dual-Core CPU E5300 2.60 GHz, 2.0 GB 内存、Windows 7 操作系统。

对于理想无倾斜角度的光栅图像,取多个同横坐标位置 $x = 737$ 的像素点 $(737, 251), (737, 342), (737, 563), (737, 781)$,这些点的点像素斜率如表 1 所示。

表 1 无倾斜光栅同横坐标(737)的像素点的斜率

点像素纵坐标 y	点像素斜率	$-\pi/x$
251	-0.00424	-0.00423
342	-0.00424	-0.00423
563	-0.00424	-0.00423
781	-0.00424	-0.00423

取多个在 $y = 737$ 同纵坐标位置的像素点, $(251, 737), (342, 737), (563, 737), (781, 737)$,这些像素点的点像素斜率如表 2 所示。

表 2 无倾斜光栅同纵坐标(737)的像素点的斜率

点像素横坐标 x	点像素斜率	$-\pi/x$
251	-0.01238	-0.01252
342	-0.00905	-0.00918
563	-0.00555	-0.00558
781	-0.00404	-0.00402

表 1~2 中 $-\pi/x$ 为像素点斜率的理论值(见式(3)),两组实验结果表明横坐标相同的像素点其点像素斜率是相同的;反之,点像素斜率则不同。

取任意两行 $y_0 = 100, y_1 = 737$,从同一起始点 $x_0 = 139$ 开始,分别求取其行像素斜率,如图 8 所示。

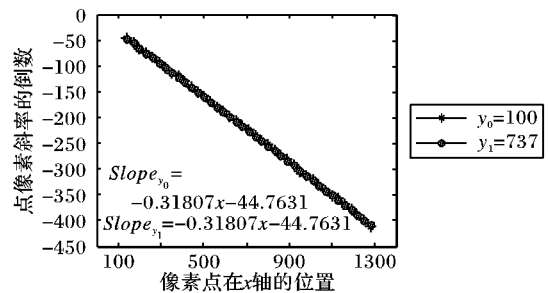


图 8 无倾斜光栅行像素斜率

实验结果表明无倾斜光栅图像,任意两行的行像素斜率相同,截距也相同。由式(4)可得理论截距 $b_y = -44.2451$,与图 8 中的截距非常接近。

对于 CCD 采集的倾斜光栅图像,仍然取 y_0, y_1 两行,从同一起始点 $x_0 = 139$ 开始,分别取两行的行像素斜率,结果如图 9 所示。

图 9 表明倾斜的光栅图像,计算任意两行的行像素斜率是不相同的,得到的截距也不相同。

对 y_0, y_1 取不同的行距值,在同水平的拟合及坐标偏移

误差下,两行行距值越大,倾斜角度计算结果的误差越小。因此,将取足够大的行距值,以提高倾斜角度计算精度。

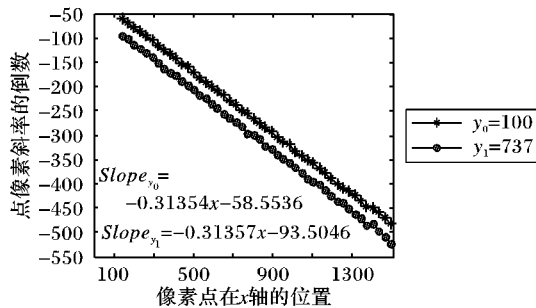


图9 倾斜光栅行像素斜率

表3列出了取不同行间距值时,该算法计算出的倾斜角度及其相对误差。表3说明,行间距值越大,倾斜角度的相对误差越小。同时验证了取足够大的行距值,能明显削弱拟合与坐标偏移误差对计算结果的影响。考虑算法精度,行距取值应当大于600像素。

表3 $y_0 y_1$ 的行间距对算法结果的影响(条纹倾斜角度 $\theta = 3.8^\circ$)

y_0	y_1	行间距	算法结果/ $^\circ$	相对误差/%
200	300	100	3.727	1.947
200	500	300	3.776	0.632
200	700	500	3.776	0.632
200	800	600	3.804	0.105
200	900	700	3.803	0.079

表4列出了取不同张光栅图像,倾斜校正算法求取到的角度大小和相对误差,表4说明一组光栅图像序列总数 N 越大,其相对误差较小,计算结果越精确。然而消耗的时间也越大,本文综合考虑算法运算量和算法精度,将 N 值取为150。

表4 光栅图像序列总数 N 对算法结果的影响(倾斜角度 $\theta = 3.8^\circ$)

N 值	算法结果/ $^\circ$	相对误差/%	时间/s
90	3.701	1.816	1.7138
120	3.723	0.974	1.8500
150	3.804	0.105	1.9260
160	3.804	0.105	1.9350
180	3.803	0.079	1.9750

在 $y_0 = 200, y_1 = 900, N = 150$ 时校正结果如图10所示。

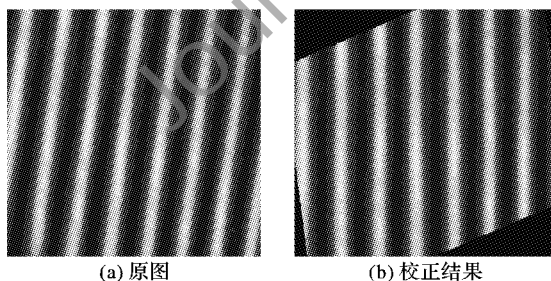


图10 倾斜校正结果

图10(a)为采集的第一帧光栅条纹图像,其存在明显的倾斜。图10(b)显示了进行倾斜校正的结果。对校正后的图像使用Hough直线检测法检验校正的结果,其倾斜角度为 0.093° 。实验结果表明,该算法能够准确地获取到图像的倾斜角度。

表5给出各个算法精度、算法速度的比较,表5说明光栅投影倾斜校正算法相对Hough变换、投影检测算法误差明显

减低,运行时间快。

表5 各算法结果对比(条纹倾斜角度 θ)

算法	$\theta = 3.8^\circ$			$\theta = 5.2^\circ$		
	角度/ $^\circ$	时间/s	误差/%	角度/ $^\circ$	时间/s	误差/%
本文算法	3.804	1.93	0.08	5.187	2.11	0.2
Hough检测算法	3.898	2.43	2.33	5.080	2.39	2.3
投影法	4.000	2.75	3.85	5.000	2.15	3.8

3 结语

本文使用垂直条纹图像进行投影,采集得到的条纹图像条纹的倾斜角度就是图像的倾斜角度。并利用像素点在时间维度上灰度值的变化特性,计算得到条纹的倾斜角度。经过对300组不同倾斜角度的光栅图像实验数据处理分析,结果表明,基于光栅投影序列图像融合的倾斜校正算法可有效避免抖动等环境因素引起的校正误差,检测出 $[-90^\circ, 90^\circ]$ 范围内的倾斜角度,准确率为99%。与Hough变换、投影法等其他倾斜校正算法相比,效率、精确度明显提高。

参考文献:

- [1] 满云凤. 基于光栅投影的复杂物体三维面形测量方法研究[D]. 北京: 中国石油大学, 2009.
- [2] 郑东亮, 达飞鹏. 提高数字光栅投影测量系统精度的Gamma校正技术[J]. 光学学报, 2011, 31(5): 0512003.
- [3] 肖丹, 陈良洲, 干江红. 基于数字光栅相移法的三维重构[J]. 光电技术应用, 2011, 26(5): 17-20.
- [4] CHAN W F. A novel optical method without phase unwrapping for subsurface flaw detection [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2009, 47(1): 186-193.
- [5] HUNTLEY J M, SALDNER H. Temporal phase-unwrapping algorithm for automated interferogram analysis [J]. Applied Optics, 1993, 32(17): 3047-3052.
- [6] CHAN F W Y. Measurement sensitivity enhancement by improved reflective computer vision technique for non-destructive evaluation [J]. Nondestructive Testing and Evaluation International, 2010, 43(3): 210-215.
- [7] 唐群群, 哈力木拉提·买买提, 艾尔肯·赛甫丁. 维吾尔文扫描页的倾斜校正[J]. 计算机应用研究, 2013, 30(5): 1551-1553, 1557.
- [8] 张吉玲, 王希常, 刘江. 基于数学形态学的文档图像倾斜校正算法[J]. 计算机应用, 2008, 28(S1): 213-214.
- [9] KONYA I, EICKELER S, SEIBERT C. Fast seamless skew and orientation detection in document images [C]// Proceedings of the 20th International Conference on Pattern Recognition. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2010: 1924-1928.
- [10] 李元金, 王涛, 马良. 基于因子缩放的车牌图像倾斜校正方法[J]. 计算机工程与科学, 2012, 34(7): 130-135.
- [11] 张祎轶. 复杂背景下女书字符图像分割和倾斜校正算法研究[D]. 武汉: 中南民族大学, 2011.
- [12] 潘梅森. 医学图像倾斜校正方法与应用研究[D]. 长沙: 中南大学, 2011.
- [13] 桑瑞娟. 一种新的CCD相机与激光相机的标定方法[J]. 西南科技大学学报, 2012, 27(4): 85-88.
- [14] 金炬宏, 穆平安, 张彩艳, 等. 一种VFD面板字符显示缺陷检测的新方法[J]. 计算机应用与软件, 2013, 30(3): 22-24.
- [15] 邱炜, 陈斌. 复杂背景下的号码定位与分割[J]. 计算机应用, 2010, 30(12): 3325-3326.