

基于图像处理的嵌入式介电泳细胞检测装置设计

董轲强, 杨其华

(中国计量大学 质量与安全工程学院, 杭州 310018)

摘要: 介电泳细胞试验中, 细胞旋转速度的检测一直是影响试验效率的重要因素; 常规的人眼识别, 工作效率低, 单次检测细胞数量少, 周期长, 并不能满足目前高通量的细胞转速检测要求; 因此, 设计了一种应用环形窗模板匹配与特征点跟踪, 实时检测介电泳细胞运动参数的装置; 重点论述了环形窗模板的匹配和特征点的标记匹配的理论算法; 利用 C++ 编程并移植到嵌入式设备中; 装置测试结果表明, 其静态图像处理能准确地分割各细胞单元, 动态处理可有效匹配细胞特征点, 检测所得的细胞旋转速度相对误差小于 1%, 满足设计指标要求。

关键词: 图像处理; 介电泳; 细胞检测; 特征匹配

Design of Embedded Dielectrophoresis Cell Detection Device Based on Image Processing

Dong Keqiang, Yang Qihua

(College of Quality & Safety Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: In the dielectrophoresis cell experiments, the cells' rotational speed detected plays an important factor in efficiency. Human eye detection is low efficiency and the test cycle is long. It cannot meet the high-throughput cell speed detection requirements. A kind of real-time method to detect dielectrophoresis cell movement parameter by circular window and feature point tracking is introduced. The matching of circular window templates and the matching of feature point are emphasized. The experiments based on C++ show that the static image processing algorithm can accurately segment the cell unit, and dynamic image processing algorithm can match feature points effectively. Relative error of cell rotation speed is less than 1%, which meets the design requirements.

Keywords: image processing; dielectrophoresis; cell detection; feature matching

0 引言

在介电泳细胞试验中, 处于溶液中的细胞受到介电场力的作用, 而发生旋转和平移, 为了检测其旋转速度, 采用人眼观察的方式显然是不可取的^[1-3]。利用图像处理技术的细胞运动参数检测技术, 考虑到图像中细胞间隔小, 且呈非标准圆形等因素, 因此其重点在于如何处理好细胞特征点标记与跟踪问题^[4]。

算法设计中首先利用环形窗模板锁定细胞, 然后显示环形窗内的原始细胞图像, 并对前后帧同一细胞图像, 进行 SURF 特征点快速检测和匹配, 最后计算出细胞相对旋转速度, 实现嵌入式系统下, 介电泳细胞的运动参数实时检测。设计要求检测所得细胞旋转速度的相对误差应小于 1%。

1 检测原理与算法

1.1 基本流程

电旋转细胞运动参数检测算法设计的核心在于细胞图像的分割与特征点的检测, 具体步骤如图 1 所示。

所设计算法首先提取前后两帧图像, 分别进行图像预处理、边缘提取、静态参数计算和 SURF 特征点标记, 然后将

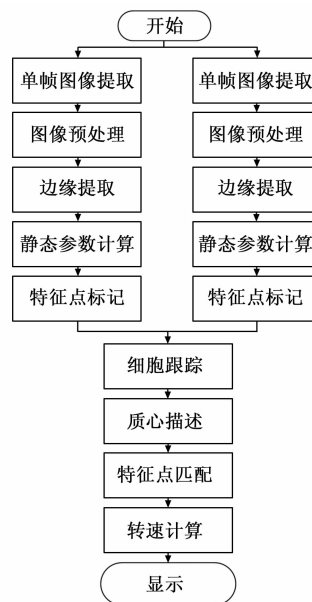


图 1 算法流程图

收稿日期:2016-04-11; 修回日期:2016-05-19。

作者简介: 董轲强(1992-), 男, 浙江宁波人, 硕士研究生, 主要从事嵌入式检测系统方向的研究。

杨其华(1962-), 男, 浙江金华人, 教授, 硕士研究生导师, 主要从事检测技术方向的研究。

这两帧图像进行细胞跟踪, 锁定同一细胞, 并进行质心描述, 最后对同一细胞进行快速特征点匹配, 并计算出转速。

1.2 图像预处理

细胞图像预处理主要包括灰度化, 滤波, 形态学滤波和阈

值分割四大部分, 预处理前后细胞图像如图 2 所示。

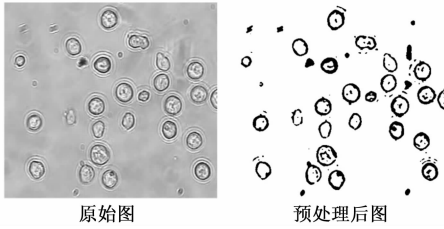


图 2 预处理前后细胞图像

常用的滤波方式有方框滤波、均值滤波、高斯滤波、中值滤波和双边滤波^[5], 选用不同的滤波方式, 并寻找合适阈值进行阈值分割, 效果如图 3 所示。在以上几种滤波方式中, 中值滤波效果明显, 且细胞轮廓闭合性较好, 实际中选用中值滤波的方式来完成滤波。

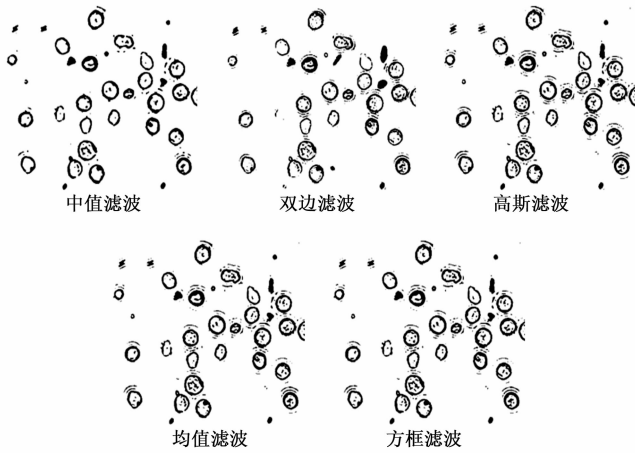


图 3 滤波效果图

1.3 细胞边缘提取

细胞边缘提取包括对闭合图形的检测、面积筛选和模板匹配三部分, 首先对二值化图像进行全图扫描, 寻找满足图 4 条件的闭合图形, 然后输出闭合图形所包围面积的大小, 根据面积大小进行筛选, 剔除背景和杂质干扰。

0	0	0	0	0
0	1	1	1	0
0	1	0	1	0
0	1	1	1	0
0	0	0	0	0

图 4 闭合图形原理

接着利用环形窗模板锁定细胞, 通过对相应环形窗的特征点匹配的方式, 代替传统的全图特征匹配。

设圆环内径长 d , 外径长 D , 待测细胞最小径长 d_c , 最大径长 D_c , 满足:

$$\{(d, D) \mid 0 < d \leq d_c < D_c \leq D, d, D \in R\} \quad (1)$$

则以圆心为原点, 环形窗内圆可表示为:

$$h(x, y) = \begin{cases} 1, & d \leq \sqrt{x^2 + y^2} \leq D \\ 0, & 0 \leq \sqrt{x^2 + y^2} < d \end{cases} \quad (2)$$

以圆心为原点, 环形窗外矩形可表示为:

$$h(x, y) = \begin{cases} 1, & d \leq \sqrt{x^2 + y^2}, |x| \leq D, |y| \leq D \\ 0, & 0 \leq \sqrt{x^2 + y^2} < d \end{cases} \quad (3)$$

模板如图 5 所示, 其内径和外径根据细胞大小而定。

1	1	1	1	1
1	0	0	0	1
1	0	0	0	1
1	0	0	0	1
1	1	1	1	1

图 5 “环形窗”模板

模板匹配即模板 $h_{D \times D}$ 在图像 $f_{M \times N}$ 上滑动 ($D < \min(M, N)$), 对筛选后的细胞色块, 作互相关运算。二维图像中, 归一化互相关函数如式 (4) 所示:

$$\hat{R}(k, l) = \frac{\sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} h(i, j) f(i+k, j+l)}{\sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} h^2(i, j) \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} f^2(i+k, j+l)} \quad (4)$$

通过内圆外方的“环形窗”与边缘提取后的细胞图像根据 (4) 式作互相关运算, 求出其极大值后可锁定某个单独的细胞, 处理效果如图 6 所示。

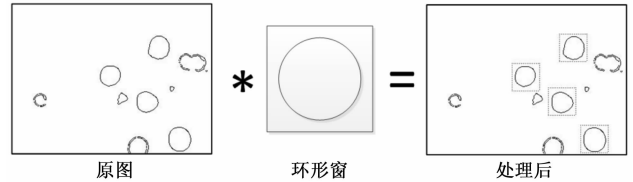


图 6 环形窗效果图

将锁定后的环形窗用黑色进行填充, 并将图像进行反色处理, 处理后与原图进行“与”运算, 便可提取出在原始图中环形窗内部细胞图像, 其他部分以全黑覆盖。

1.4 特征点标记匹配

由于细胞的平移运动并不剧烈, 可利用静态参数计算中所得到的细胞质心, 以上一帧图像中所求出的细胞质心坐标为中心, 在当前帧寻找该质心附近的细胞, 实现细胞与环形窗的匹配。

将匹配后的环形窗内部图像成对进行提取, 并利用 SURF 算子对图像中的极值点进行标记, 具体步骤如下^[6-7]:

- 1) 构建 Hessian 矩阵构造高斯金字塔尺寸空间;
- 2) 利用非极大值抑制初步确定特征点;
- 3) 利用三维线性插值法, 精确定位极值点;
- 4) 统计特征点领域内 harr 小波特征, 选取特征点主方向;
- 5) 构造 surf 特征点描述算子。

SURF 算子由 Bay 在 2006 年首次提出, 是尺度不变特征变换算法的加速版。理论上前者是后者速度的 3 倍, 且在多幅图片的情况下, 其稳定性更好^[8]。

从图 7 可知, 虽然大部分特征点的匹配都正确, 但仍存在一定量匹配错误, 并且特征点分布分散, 不利于计算细胞旋转速度。因此提出将特征点匹配范围缩小至环形窗内, 这样不但提高了算法可靠性, 同时也大大节省了计算时间。单细胞前后

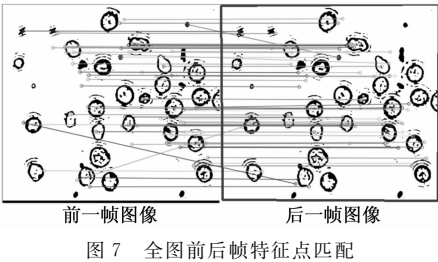


图 7 全图前后帧特征点匹配

帧特征点标记匹配图如图 8 所示。

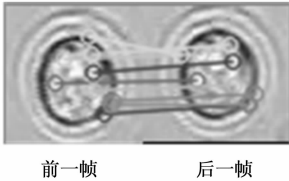


图 8 单细胞前后帧特征点匹配

对于匹配中存在的坏点, 在计算旋转速度时, 通过筛选旋转速度值进行剔除。

1.5 细胞旋转速度计算

细胞的旋转速度是介电电泳检测中的一个重要动态参数, 通过测量细胞的旋转速度, 就可以判断出目前细胞的活性特征。

以前一帧图像作为参照系, 统计在细胞边缘及细胞内的特征点相对质心的变化角度, 并求其平均值。选取细胞边缘或细胞内的特征点, 设第 p 帧图像中待研究细胞的特征点坐标为 (x_p, y_p) , 则第 $p+1$ 帧与第 p 帧之间细胞转过的角度为:

$$\Delta\theta_{pi} = \theta_{p+1} - \theta_p = \arctan \frac{y_{p+1}}{x_{p+1}} - \arctan \frac{y_p}{x_p} \tag{5}$$

设共有 n 个特征点在细胞边缘或细胞内, 第 i 个特征点坐标相对质心的转动角度为 $\Delta\theta_{pi}$, 则其平均旋转角度为:

$$\Delta\theta_p = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta\theta_{pi} \tag{6}$$

若帧一帧之间时差为 Δt , 则细胞瞬时角速度为:

$$\omega_p = \frac{\Delta\theta_p}{\Delta t} \tag{7}$$

2 硬件平台搭建

硬件平台采用 S5PV210 芯片为核心, 搭载 Linux 操作系统, 其外围接口及组件如图 9 所示。摄像机选用 USB 2.0 高分辨率数字摄像机 MVC1000M, 输出图像为灰度图, 能有效减少图像采集和处理的系统开销, 提高运行效率。

硬件系统的摄像机可与显微镜系统相连接, 除摄像机外, 装置实际大小为 100 mm×90 mm×30 mm, 可外接 LCD 显示屏, 试验中选用 7 英寸 LCD 屏。具有体积小、易拆卸、便携式等优点。

S5PV210 为 584 引脚 FCFBGA 封装的 ARM—A8 架构处理器, 采用 +5 V/2 A 电源供电。为扩展其接口, 将处理器的 P1.32 和 P1.34 管脚连接 USB2514, 使一对上行数据总线转换为四对下行数据总线, 相关电路如图 10 所示。同时, 为了保证系统的稳定性, USB 接口需要实现过流检测中断功能, 通过 USB2514 的 PRTPM 和 OCS 管脚外接限流保护电路, 即可实现此功能。在本设计中, 选用内部集成限流保护电路的

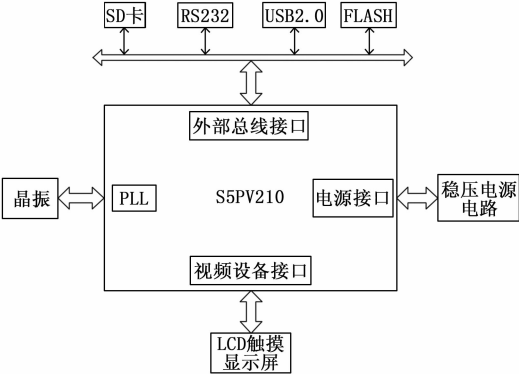


图 9 硬件平台

MIC20261BM 芯片进行限流保护。当下行 USB 输出由于短路等原因, 导致电流过大时, MIC20261BM 芯片能够自动切断下行端口的供电, 从而保护系统和负载, 保护电路如图 11 所示。

RS232 接口硬件电路主要是利用 SP3232 芯片将处理器的 TTL 电平转换为符合 EIA—RS—232C 规范的标准电平, 用于

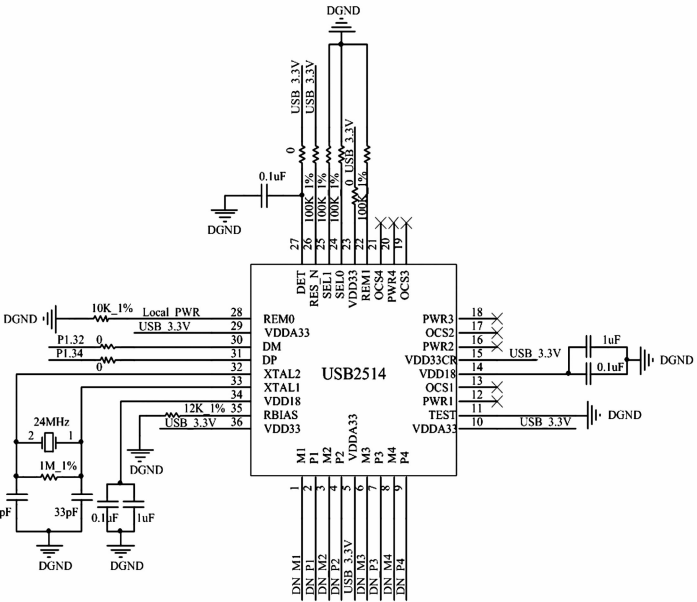


图 10 USB2514 外围电路

通信传输, 相关电路如图 12 所示。

3 实验与数据分析

算法实现过程中, 结合 OpenCV 库与 C++ 进行设计编程^[9-10], PC 机上调试通过后, 移植到所搭建的嵌入式平台中。

最后, 利用已知旋转速度的参考电旋转细胞视频对算法进行试验, 算法的细胞识别情况如表 1 所示。

表 1 细胞识别结果

实际细胞数	正确识别数	错误识别数	识别率 %
23	20	0	86.96
22	20	0	90.91
23	20	0	86.96
22	20	0	90.91
22	21	0	95.45

由表 1 得, 大部分细胞都能被有效识别, 少数细胞由于细

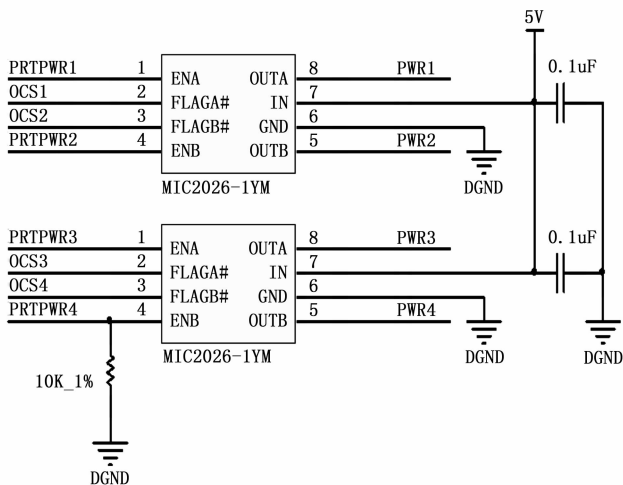


图 11 USB 过流保护电路

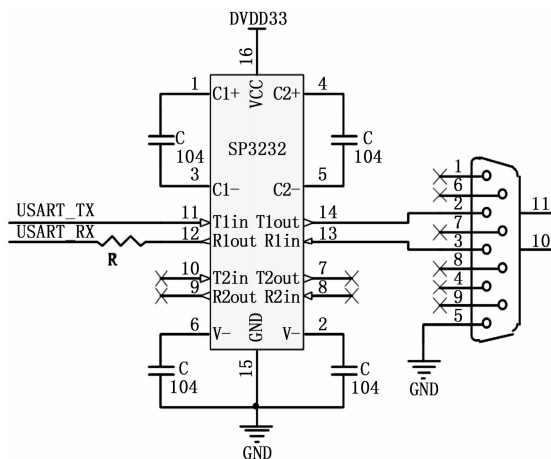


图 12 RS232 电平转换电路

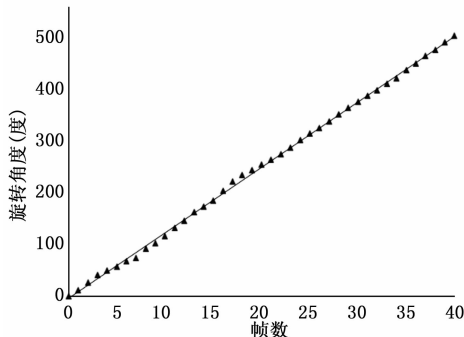


图 13 单帧细胞旋转角度

了对介电泳细胞动态参数检测的嵌入式装置设计。利用 C++ 实现算法, 并移植到嵌入式设备中。装置实验结果表明, 装置能准确地识别出各细胞单元, 并有效匹配细胞特征点, 检测所得的细胞旋转速度相对误差小于 1%, 满足设计指标要求。

参考文献:

- [1] Khashayar K, Saeid N, Sara B, et al. Dielectrophoretic platforms for bio-microfluidic systems [J]. Biosensors and Bioelectronics, 2011, 26: 1800-1814.
- [2] Odorizzi L, Ress C, Collini C, et al. An integrated platform for in vitro single-site cell electroporation: controlled delivery and electrodes functionalization [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2012, 170: 182-188.
- [3] Demierre N, Braschler T, Muller R, et al. Focusing and continuous separation of cells in a microfluidic device using lateral dielectrophoresis [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2008, 132: 388-396.
- [4] Yang Qihua, Wang Qiang. Tissue Cell Boundaries Detection based on Curvelet-based Snake Model in Electrorotation Bio-chip Control System [A]. In BioMedical Engineering and Informatics [C], SanYa: BMEI, 2008. 728-732.
- [5] 曾爱林. 基于改进神经网络的图像生物特征识别方法 [J]. 科技通报, 2015, 31 (2): 224-226.
- [6] 冯艺东, 孙 跃. 基于 SURF 特征提取和 FLANN 搜索的图像匹配算法 [J]. 图学学报, 2015, 36 (4): 650-654.
- [7] 康红哲. 人体运动图像动态视点平滑能量衰减过程仿真 [J]. 科技通报, 2015, 31 (1): 236-239.
- [8] 张华俊, 李桂华, 刘 程, 等. 基于 SURF 特征匹配的数字图像相关变形初值可靠估计 [J]. 光学学报, 2013, 33 (11).
- [9] 陈博华, 戴少鹏. 基于 OpenCV 的图像处理办法 [J]. 电子技术与软件工程, 2015 (9).
- [10] Joseph Howse. Android Application Programming with OpenCV [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008: 162-170.
- [7] 王立剑. 基于 Android 平台的手机室内定位及导航的设计与实现 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.
- [8] Jeong Won Kim, Han Jin Jang, Dong-Hwan Hwang, et al. A step, stride and heading determination for the pedestrian navigation system [J]. Journal of Global Positioning Systems, 2004, 3 (1): 273-279.
- [9] 朱建佳. 基于 Android 平台的室内导航系统的设计与实现 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2014.
- [10] Chang Chihchung, Lin Chihjen. LIBSVM: a library for support vector machines [EB/OL]. (2013-04-01) [2013-07-14]. <http://www.csie.ntu.edu.tw/~cjlin/libsvm>.

胞膜破裂或较薄而无法识别, 并不影响试验结果。为解决以上问题, 可适当增加预处理算法中膨胀力度进行改进, 但可能增大细胞旋转速度的测量误差。

单帧细胞旋转角度图如图 13 所示。

参考细胞视频细胞单帧的平均旋转角度约为 12.4° , 帧速率为 25 帧/秒, 因此参考旋转速度为 $310^{\circ}/s$, 检测计算出的旋转速度为 $308.3^{\circ}/s$, 可得相对误差 0.55%, 满足 1% 的设计指标要求。

4 结论

本文应用环形窗模板与 SURF 特征点跟踪的方法, 完成

(上接第 233 页)

- [3] Yamasaki R, Ogino A, Tamaki T. TDOA location system for IEEE 802. 11b WLAN [A]. Proc of Wireless Communications and Networking Conference [C]. IEEE Press, 2005: 2338-2343.
- [4] 韦 丹. 基于移动终端的室内关键定位技术研究 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2014.
- [5] 邓志安, 徐玉滨. 基于支持向量机回归算法的 WLAN 室内定位系统 [J]. 仪器仪表学报, 2009, 30 (6): 578-582.
- [6] 赵逢达, 闫亭亭, 孔令富. 一种基于粒子滤波的智能移动终端室内行人定位算法 [J]. 小型微型计算机系统, 2014, 35 (8): 1842-1847.