

PTZ 摄像机跟踪运动目标的智能控制算法的研究

陈双叶 王善喜

(北京工业大学电子信息与控制工程学院 北京 100124)

摘要 针对传统的 PTZ 摄像机跟踪运动目标时依靠人工操作,无法连续、实时动态跟踪,甚至导致跟踪失败的缺点,提出以 HSV 颜色直方图作为模型特征,通过 Camshift 算法和卡尔曼滤波器实现运动目标的定位和预测补偿,运用闭环控制机制自动调节云台的转动和镜头的变倍,提高了系统的实时性。通过 Android 智能手机手动调节云台和镜头,配合自动跟踪系统,使跟踪效果更准确。结果表明:该方法可行的,具有控制简单、定位准确的优点,能提高目标跟踪的实时性和可靠性。

关键词 PTZ 摄像机,颜色直方图,Camshift,卡尔曼滤波器,Android

中图分类号 TP391.4 **文献标识码** A

Research on Intelligent Control Method for Moving Object Tracking Based on PTZ Camera

CHEN Shuang-ye WANG Shan-xi

(College of Electronic Information & Control Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract According to the defects of tracking moving object by PTZ camera, such as relying on manual operation, un-real-time and uncontinuous tracking, almost leading to the failure of tracking, a new intelligent control system was designed by using HSV color histogram as model feature. Then Camshift algorithm was adopted to realize object tracking location and Kalman filter model was adopted to estimate the moving object location of the next time. Finally closed loop idea was used to controll PTZ camera platform movement and lens automatic zoom. The new system improves the real-time performance. Cooperating with the intelligent control system, the effect of tracking is more accurate by controlling the PTZ camera with Android smart phone. The results show that the method is feasible, has the advantages of simple control and remaining correct location, and it also can improve real-time performance and reliability of object tracking.

Keywords PTZ camera, Color histogram, Camshift, Kalman filtering, Android

1 引言

目标跟踪是图像处理与计算机视觉领域中一个活跃的分枝,在交通、安全生产等领域有着广泛的应用前景。PTZ 摄像机^[1]由 CCD 摄像机、变焦变倍镜头、全景云台、解码器等组成。目前,在多数 PTZ 摄像机监控系统中,人工通过操作键盘摇杆对监控区域的运动目标进行跟踪。目标远离摄像机,需要人工手动控制镜头变倍,对目标进行特写放大,人为跟踪误差太大,甚至可能导致跟踪失败^[2]。本课题提出一种智能化 PTZ 摄像机自动跟踪运动目标且实时变倍的监控系统,即为确定跟踪的运动目标,采用 Kalman 滤波器对目标的运动状态进行预测,在预测位置使用 Camshift 算法进行特征匹配,完成目标锁定,通过闭环控制机制,自动控制云台转动实时跟踪监控目标,同时镜头自动变倍。在复杂的监控环境背景下或自动跟踪系统出现故障时,通过 Android 手机手动控制云台摄像头并配合自动跟踪系统,使监控效果更加准确。

2 系统的整体结构和功能概述

本文提出的通过 PTZ 摄像机自动跟踪运动目标的智能

控制系统由 PTZ 摄像机、视频电缆、视频采集卡、PC 机、串口转换器、通信电缆和基于 Android 系统的智能手机等组成。如图 1 所示,视频电缆将 PTZ 摄像机采集的监控视频信号传输到视频采集卡内,模拟视频转换为数字视频后传递到 PC 机,基于 OpenCV 平台^[3],PC 机通过跟踪算法对摄像机反馈来的数据进行分析处理,将控制指令通过串口发送给云台和镜头,实现云台的转动和镜头的变倍,在自动跟踪系统出现故障或监控环境比较复杂的情况下,基于 Android 系统的智能手机通过无线连接可手动调节云台转动和镜头变倍,保证顺利完成监控任务,提高了可操作性。

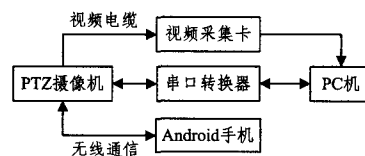


图 1 系统框图

3 跟踪运动目标算法的研究

3.1 Kalman 滤波器

Kalman 滤波器是一种线性递归滤波器,通过动态状态方

陈双叶(1970-),男,副教授,硕士生导师,主要研究方向为智能仪器仪表、嵌入式系统 DSP, E-mail: chenshuangye@bjut.edu.cn; 王善喜(1987-),男,硕士,主要研究方向为图像处理、机器视觉。

程和观测方程描述系统^[4,5]。在视频跟踪算法中,其用来预测目标下一时刻的位置,提高了系统的实时性。

分别建立系统的状态方程和观测方程:

$$X_k = AX_{k-1} + W_{k-1} \quad (1)$$

$$Z_k = HX_k + V_k \quad (2)$$

其中, A 是系统状态转移矩阵; X_k 是系统状态向量; W_{k-1} 是随机干扰噪声向量; H 是系统观测矩阵; Z_k 是观测向量; V_k 是系统观测噪声向量; W_{k-1} 、 V_k 通常假设为互相独立的零均值高斯白噪声向量。

设 Q_k 为系统噪声矢量的协方差矩阵, R_k 为观测噪声矢量的协方差矩阵,则得到以下关系:

$$E[W_k W_k^T] = Q_k \delta_{kj} \quad (3)$$

$$E[V_k V_k^T] = R_k \delta_{kj} \quad (4)$$

式中, δ_{kj} 为克罗尼克函数,其特性是当 $k=j$ 时,其值为1;当 $k \neq j$ 时,其值为0。

Kalman 滤波的过程如下。

第一步 预测

状态预测方程:

$$\hat{X}_k' = A \hat{X}_{k-1} \quad (5)$$

均方误差预测方程:

$$P_k' = AP_{k-1}A^T + Q_{k-1} \quad (6)$$

第二步 根据观察结果修正

Kalman 增益系数方程:

$$K_k = \frac{P_k' H^T}{H P_k' H^T + R_k} \quad (7)$$

状态修正方程:

$$\hat{X}_k = A \hat{X}_{k-1} + K_k (Z_k - H A \hat{X}_{k-1}) \quad (8)$$

协方差修正方程:

$$P_k = (I - K_k H) P_k' \quad (9)$$

其中,通过上一时刻修正值预测出估计值向量 \hat{X}_k' , P_k' 为预测的均方误差, K_k 为 Kalman 增益系数,测量值的状态修正值与修正后的协方差分别为 \hat{X}_k 、 P_k 。

3.2 Camshift 算法

Camshift 将 Meanshift 算法扩展到连续视频图像序列,是基于连续图像颜色动态变化的概率分布的一种有效运动目标跟踪算法^[6]。该算法以颜色直方图为跟踪特征,由 Back Projection、Meanshift、Camshift 3 部分组成。

3.2.1 Back Projection

为了降低光照亮度变化对跟踪效果的影响,将图像按式(10)从 RGB 空间转换到 HSV 空间。选择感兴趣的目标区域,计算该区域的颜色直方图,将图像中每个像素的值用其颜色出现的概率进行替换,反向投影到当前的原始视频图像,得到当前帧的颜色概率分布图。

$$H = \arccos \left[\frac{2R - G - B}{2\sqrt{(R-B)^2 - (R-B)(G-B)}} \right] \quad (10)$$

3.2.2 Meanshift

Meanshift 算法采用目标的颜色直方图作为搜索特征,通过不断迭代 meanshift 向量使算法收敛于目标的真实位置^[7]。该算法的过程如下:

1) 在颜色概率分布图中取大小为 s 的搜索窗。

2) 计算搜索窗。

零阶矩:

$$M_{00} = \sum_x \sum_y I(x, y) \quad (11)$$

一阶矩:

$$M_{10} = \sum_x \sum_y x I(x, y) \quad (12)$$

$$M_{01} = \sum_x \sum_y y I(x, y) \quad (13)$$

搜索窗的质心坐标为:

$$x_s = \frac{M_{10}}{M_{00}}, y_s = \frac{M_{01}}{M_{00}} \quad (14)$$

其中, $I(x, y)$ 是投影图中坐标 (x, y) 的像素值。

3) 调整搜索窗口的大小。

$$\text{宽度: } s = 2\sqrt{\frac{M_{00}}{256}} \quad (15)$$

高度:

$$h = 1.2s \quad (16)$$

4) 移动搜索窗中心到质心,若移动距离大于预设阈值,重复 2) 和 3),当搜索窗中心与质心间的距离小于预设的阈值,停止运算。

3.2.3 Camshift

Camshift 对视频序列每一帧都进行 meanshift 运算,将上一帧 meanshift 结果,即搜索窗的大小和质心,作为下一帧 meanshift 算法搜索窗的初始值,如此不断循环迭代,实现对运动目标的连续跟踪。

3.3 Kalman 滤波器和 Camshift 算法的结合

定义 Kalman 滤波器的系统状态向量 $X_k = (c_x, v_x, c_y, v_y)^T$, c_x 和 c_y 为目标中心在 x 轴和 y 轴的位置坐标, v_x 和 v_y 为目标在 x 轴和 y 轴的速度分量。观测向量 $Z_k = (cc_x, cc_y)^T$, cc_x 和 cc_y 分别表示当前视频帧中观测到的目标中心位置在 x 轴和 y 轴的位置坐标。假设目标在单位时间间隔内匀速运动,定义状态转移矩阵 A 为:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & t & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & t \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

其中, t 表示连续两帧图像的时间间隔;观测矩阵 H 为:

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

协方差矩阵 Q_k 和 R_k 分别为:

$$Q_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, R_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Kalman 滤波器对跟踪目标的运动速度和位置进行预测,在预测位置区域使用 Camshift 算法进行目标位置搜索,得到收敛的位置坐标,以此坐标作为观测值,对 Kalman 滤波器进行修正,得到当前目标的最优位置坐标和下一时刻新的修正预测方程^[8]。通过 Camshift 算法的跟踪定位和 Kalman 滤波器的估计预测的结合,使跟踪效果更加准确。过程如下:

1) 选定跟踪目标,把包围目标的矩形框作为初始窗,其大小和中心位置坐标作为 Camshift 算法的初始输入,初始化

Kalman 滤波器的必要参数及初始状态向量,即: $X_0 = (x_0, 0, y_0, 0)^T$;

2)把窗口中心坐标作为 Kalman 滤波器预测质心坐标, $2\sqrt{A}$ 为新窗口宽度(A 为前一帧窗口面积)。由预测的搜索窗得出当前帧中搜索窗口质心位置,由式(15)、式(16)调整搜索窗口的大小。

3)移动搜索窗中心到质心,若移动距离大于预设阈值,重复 2)、3),直到移动距离小于预设的阈值。

4)把通过 Camshift 算法得到的运动目标收敛的质心坐标作为 Kalman 滤波器的观测值,更新 Kalman 滤波器的相关系数,得到修正后的运动目标质心位置的最优估计。

5)读取下一帧视频图像,把前一帧运动目标质心最优估计位置作为当前帧的中心位置的预测位置, $\sqrt{2}A$ 作为窗口宽度,返回到 2)循环直到跟踪停止。

4 PTZ 摄像机跟踪控制系统

如图 2 所示,自动跟踪系统选取跟踪目标,利用跟踪算法计算出运动目标的质心坐标,计算该位置与图像预设位置的偏差及方向,通过串口通信自动控制云台转动。自动跟踪系统故障或监控环境复杂时,通过 Android 手机手动调节云台转动及镜头的变焦。

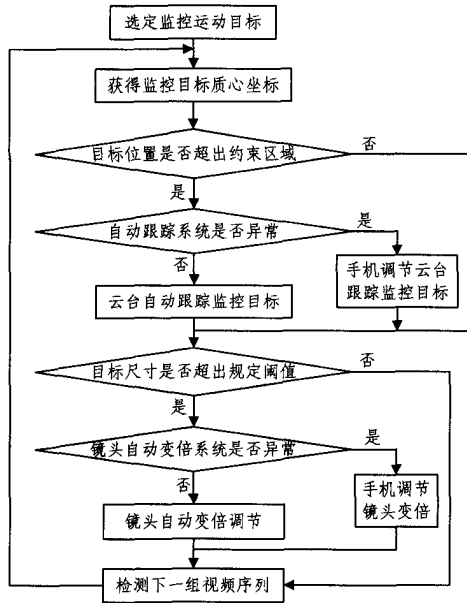


图 2 PTZ 摄像机控制系统框图

4.1 PTZ 摄像机自动跟踪控制系统

摄像机频繁运动对运动目标的准确检测不利,设定约束区域,运动目标偏移视域中心的距离超过预设阈值时,云台才转动跟踪目标^[9,10]。如图 3 所示,约束区域为半径为 R 的圆形,检测到运动目标质心坐标为 $M(x, y)$,质心坐标不在圆内时,控制云台转动跟踪目标。

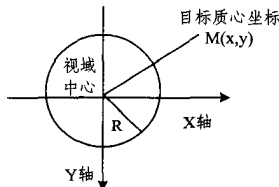


图 3 运动目标坐标示意图

设 α, β 为摄像头水平、垂直视角的一半, r 为运动目标 M 与云台的斜距,通过控制云台水平方位角 ϕ 及垂直高低角 θ ,使运动目标质心始终在圆形约束区域内。控制算法推导如下:

$$x_m = r \tan \alpha, y_m = r \tan \beta \quad (17)$$

其中, x_m, y_m 与图像分辨率有关,如图像分辨率为 750×600 时, $x_m = 750/2, y_m = 600/2$ 。运动目标 M 的质心坐标表达式为:

$$x = r \tan \phi, y = r \tan \theta \quad (18)$$

由式(17)、式(18)推导得:

水平方位角:

$$\phi = \arctan(x \tan \alpha / x_m) \quad (19)$$

垂直高低角:

$$\theta = \arctan(y \tan \beta / y_m) \quad (20)$$

4.1.1 云台方向控制

由摄像头采集的每一帧图像信息可以得到视域中心坐标 $N(a, b)$,由跟踪算法得到运动目标质心坐标 $M(x, y)$,结合图 3,得到目标质心与视域中心坐标的横纵坐标之差:

横坐标之差:

$$\Delta x = x - a \quad (21)$$

纵坐标之差:

$$\Delta y = y - b \quad (22)$$

- 1)当 $\Delta x > R$ 且 $|\Delta y| \leq R$ 时,云台水平向右运动;
- 2)当 $\Delta x > R$ 且 $\Delta y < -R$ 时,台云向右上方运动;
- 3)当 $|\Delta x| \leq R$ 且 $\Delta y < -R$ 时,云台垂直向上运动;
- 4)当 $\Delta x < -R$ 且 $\Delta y < -R$ 时,云台向左上方运动;
- 5)当 $\Delta x < -R$ 且 $|\Delta y| \leq R$ 时,云台水平向左运动;
- 6)当 $\Delta x < -R$ 且 $\Delta y > R$ 时,云台向左下方运动;
- 7)当 $|\Delta x| \leq R$ 且 $\Delta y > R$ 时,云台垂直向下运动;
- 8)当 $\Delta x > R$ 且 $\Delta y > R$ 时,云台向右下方运动。

云台遵循 PELCO-D 协议,向水平向左、水平向右、垂直向上、垂直向下 4 个方向转动。水平与垂直方向都要调节时,对比水平转动时间 t_1 和垂直方向转动时间 t_2 ,取用时较小的转动方向作为云台优先转动方向,过程如下:

$$t_1 = |\Delta x| / v_x, t_2 = |\Delta y| / v_y \quad (23)$$

式中, v_x, v_y 分别为云台水平和垂直转动速度。

4.1.2 云台转速控制

云台转动速度变化时,需要速度过渡时间,即云台的最小转矩^[11]。发送控制速度指令时间间隔与云台步进电机处理变速转动时间 T_0 应大于最小转矩。求出云台水平方向和垂直方向上每转动 1° 所用的时间:

水平方向:

$$t_x = T_0 / (\phi + \theta) \quad (24)$$

垂直方向:

$$t_y = T_0 / (\phi + \theta) \quad (25)$$

其中, ϕ, θ 为式(19)、式(20)的云台控制角度。

云台水平转动速度:

$$v_x = \text{Count}x / t_x \quad (26)$$

云台垂直转动速度:

$$v_y = \text{Count}y / t_y \quad (27)$$

其中, $Count_x$ 为水平转动常量, 无量纲; $Count_y$ 为垂直转动常量, 无量纲。

4.1.3 云台 ZOOM 控制

当运动目标的质心与视域中心的距离小于预设的阈值 r_1 时, PTZ 摄像机以标配速度进行变倍缩放。在变倍过程中, 预设的目标显示的合适尺寸为 s_1 , 当前目标在画面中实际尺寸大小为 s_2 , s_0 为预设阈值, 调节过程如下:

当 $s_1 - s_2 > s_0$ 时, 摄像头进行放大操作;

当 $s_1 - s_2 < -s_0$ 时, 摄像头进行缩小操作。

4.2 Android 手机手动控制 PTZ 摄像机

自动跟踪系统故障或环境复杂时, 为了更好地完成跟踪任务, 通过 Android^[12] 手机控制摄像头和云台, 该客户端与摄像机无线通信。本文主要介绍云台控制界面和 ZOOM 控制界面。云台控制界面包括上下左右 4 个方向的控制按钮, 通过操作各个按钮, 控制云台的转动方向。ZOOM 控制界面(见图 4)由按钮和滑动条组成, 通过滑动条可快速滑动到理想尺寸位置, 再通过按钮微调缩放倍数, 直到达到理想效果。



图 4 ZOOM 控制界面

5 实验结果及分析

基于 OpenCV 平台, 对运动小车进行跟踪, 如图 5 所示, 分析如下: 图 5 中, 图(a)到图(c)为手机手动调节云台转动及镜头变倍的结果, 图(a)为运动的小车, 位置基本显示在图像的中间; 图(b)为小车远离摄像机运动, 显示在图像的右上角, 尺寸变小, 则云台应该向右上方运动, 且镜头应该变倍以使小车在显示图像中尺寸变大, 此时通过手机调节云台转动及镜头变倍(见图 4), 调整结果如图(c); 图(d)到图(l)为自动调节云台转动及镜头变倍的结果, 图(d)为运动的小车, 位置基本显示在图像的中间; 图(e)小车远离摄像机运动, 显示在图像的右上角, 尺寸变小, 则云台向右上方运动, 使小车显示在图像的中间位置, 调整结果如图(f); 图(g)镜头自动变倍, 小车尺寸变大; 图(h)小车向障碍物方向运动; 图(i)运动的小车被遮挡; 图(j)小车越过障碍物, 继续被跟踪; 小车显示在图像的右方, 云台水平向右运动, 调整结果如图(k); 图(l)镜头自动变倍, 小车尺寸变大。实验过程中, 手机手动调节云台及镜头, 实现了对运动小车的实时跟踪及镜头变倍; 无障碍物时, 智能跟踪系统对运动的小车跟踪效果良好, 实现自动变倍; 小车正好被障碍物遮挡时, 系统不能对小车进行定位; 小车越过障碍物时, 小车能继续被跟踪。结果表明, 该系统跟踪运动目标效果良好, 实现了变倍功能。



图 5 智能跟踪实验结果

结束语 设计的跟踪运动目标的智能控制系统采用 Camshift 算法定位和 Kalman 滤波器预测补偿相结合的方法跟踪运动目标, 跟踪效果良好, 实现了 PTZ 摄像机云台转向和镜头变倍, 自动跟踪系统出现故障时, 采用 Android 手机手动调节镜头和云台, 完成对目标的跟踪。在实际生活应用中, 还需要对系统控制算法进行完善, 以提高智能控制系统的抗干扰性和稳定性。

参考文献

- [1] 宗伟伟. 基于 PTZ 摄像机的运动目标跟踪算法研究与实现[D]. 沈阳: 东北大学, 2011: 46-54
- [2] 李波. 基于视频的云台镜头目标自动跟踪算法研究与实现[D].

[3] 刘瑞祯,于仕琪. OpenCV 教程[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2007:406-421

[4] 陈林. 一种基于卡尔曼滤波的运动目标跟踪方法[J]. 舰船电子对抗,2011,34(3):67-70

[5] 龚声蓉,刘纯平,季怡. 复杂场景下图像与视频分析[M]. 北京:人民邮电出版社,2013:367-373

[6] 张宏志,张金换,岳卉,等. 基于 Camshift 的目标跟踪算法[J]. 计算机工程与设计,2006,27(11):2012-2014

[7] 邹小东,于鸿洋,张萍. 基于 Camshift 与 Kalman 滤波算法的动

[8] 孙凯,刘士荣. 多目标跟踪的改进 Camshift/卡尔曼滤波组合算法[J]. 信息与控制,2009,38(1):9-14

[9] 贾茜,谢勤岚. 高速球型摄像机 PTZ 跟踪策略设计及实现[J]. 计算机工程及应用,2011,47(31):197-200

[10] 张雪波,路晗,方勇纯,等. 室外环境下 PTZ 摄像机全自动标定技术及其应用[J]. 机器人,2013,35(4):385-393

[11] 杨亮,周勇,刘欲浏. 基于 PTZ 摄像机的运动目标跟踪控制[J]. 兵工自动化,2014,33(3):65-68

[12] 李宁. Android 开发权威指南[M]. 北京:人民邮电出版社,2013

(上接第 125 页)

表 1 自动分割亮斑方法评价参数结果($d=20$)

参数组合	面积覆盖(%) (均值±标准差)	欠分割率(%) (均值±标准差)	过分割率(%) (均值±标准差)
$r=1, n=5$	68.19±7.92	16.25±11.85	15.56±9.77
$r=2, n=5$	67.71±7.96	15.92±11.69	16.37±9.72
$r=3, n=5$	66.30±10.51	17.07±14.03	16.63±10.49
$r=1, n=6$	68.44±8.48	16.65±12.48	14.91±9.47
$r=2, n=6$	68.50±8.37	16.57±12.33	14.93±9.48
$r=3, n=6$	68.54±8.46	16.57±12.31	14.89±9.57
$r=1, n=7$	68.34±8.72	16.92±12.94	14.74±9.50
$r=2, n=7$	68.33±8.72	16.92±12.94	14.76±9.51
$r=3, n=7$	68.32±8.72	16.91±12.94	14.77±9.52



图 6 人工分割和自动分割叠加图

从图 6 可以看出,造成欠分割率偏高的主要原因是在亮斑边界处的分割有较大的差异和漏分割,前者可能是由于亮斑边界区域比较模糊且灰度较低,人工分割会有一定误差,而自动分割在区域生长过程中把该区域识别为背景,因此造成欠分割。后者可能是由于漏分割的亮斑灰度相比于其他亮斑较小,自动分割是根据阈值法来确定种子集合的,因此在自动分割时未被分割出来。造成过分割率偏高的其中一个原因是在亮斑边界区域存在差异;另一个原因可能就是亮斑本身较小,人工分割没有考虑它或者人工分割出的面积小于本文设定的最小面积值 80,而自动分割出的亮斑面积却大于 80,结果造成误分割。由于亮斑较小,微小的差异也会产生大的误差。综上,本文方法在一定程度上能较准确地分割出亮斑的区域。

结束语 本文主要在视网膜层分割限制亮斑所在区域的基础上,采用自适应阈值结合基于人类视觉特性的区域生长算法来分割出亮斑;同时通过重复实验确定了区域生长算法较好的参数组合来获得较好的分割效果。实验表明本文方法基本能实现自动分割亮斑的功能,但还存在许多需要改进的

地方,特别是在区域生长边界的控制上,可以结合亮斑的边缘特点及其背景信息作进一步改进;也可以适当调整关于视觉特性的相关参数,使得实验结果更加准确。

参考文献

[1] Wojtkowski M, Bajraszewski T, Targowski P, et al. Real-time in vivo imaging by high-speed spectral optical coherence tomography[J]. Optics Letters, 2003, 28(19):1745-1747

[2] Xu S Z, Huang S H, Ma Q K, et al. Study on intra-retinal layers imaged with ultra-high resolution optical coherence tomography [J]. International Eye Science, 2014, (8):1494-1497

[3] 周从容,刘波,葛秦,等. 糖尿病视网膜病变与硬性渗出位置相关因素的探讨[J]. 中国医师杂志,2003,5(12):1663-1663

[4] Lammer J, Bolz M, Baumann B, et al. Detection and analysis of hard exudates by polarization-sensitive optical coherence tomography in patients with diabetic maculopathy[J]. Invest Ophthalmol Vis Sci. 2014, 55:1564-1571

[5] 潘燕红,潘林. 基于 SVM 的眼底图像硬性渗出检测[J]. 计算机与现代化,2014(4):33-37

[6] Walter T, Klein JC, Massin P, et al. A contribution of image processing to the diagnosis of diabetic retinopathy: Detection of exudates in color fundus images of the human retina [J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2002, 21(10):1236-1243

[7] Lang A, Carass A, Swingle E K, et al. Automatic segmentation of microcystic macular edema in OCT. [J]. Biomedical Optics Express, 2014, 6(1):155-169

[8] Manduchi R, Computer A, Inc. Bilateral Filtering for Gray and Color Images[C]//IEEE International Conference on Computer Vision. Narosa Publishing House, 1998

[9] 王玉灵. 基于双边滤波的图像处理算法研究[D]. 西安电子科技大学, 2010

[10] Chiu S J, Li X T, et al. Automatic segmentation of seven retinal layers in SDOCT images congruent with expert manual segmentation[J]. Optics Express, 2010, 18(18):19413-19428

[11] 王茜,彭中,刘莉. 一种基于自适应阈值的图像分割算法[J]. 北京理工大学学报, 2003, 23(4):521-524

[12] 谭洪波,侯志强,刘荣. 基于人类视觉模型的区域生长图像分割[J]. 中国图象图形学报, 2010, 15(9):1352-1356

[13] 时佳佳. 视网膜症状性渗出液相关紊乱的自动化分割与定量分析研究[D]. 南京:南京理工大学, 2014