

文章编号 1004-924X(2016)04-0945-09

交比不变的 Camshift 跟踪方法

黄晋英, 宋国浩*, 兰艳亭, 王 宁, 杨 航
(中北大学 机械与动力工程学院, 山西 太原 030051)

摘要: 为了提高 Camshift 跟踪方法在复杂环境下的跟踪性能, 应用被跟踪目标内部各特征像素间的交比不变原理, 提出了一种改进的 Camshift 跟踪方法。该方法通过分析被跟踪的目标模型, 计算出其内部各特征像素间的坐标关系; 将内部数据间的交比不变量作为所提出的跟踪方法的约束条件, 对跟踪错误的像素点进行校正, 并将跟踪过程中连续两帧图像的内部特征像素间的距离比作为跟踪效果的评判标准。用改进的 Camshift 跟踪方法分别对标准测试视频内的视频信息和实际拍摄的视频信息进行了测试。结果显示, 该方法在两种复杂环境实验条件下, 跟踪目标的距离偏差都能保持在 15 pixel 以内, 对单帧图像平均处理时间在 20 ms 以内。试验结果表明, 该方法对复杂环境下的目标具有良好的跟踪效果, 跟踪性能稳定, 跟踪效率高, 可以满足跟踪系统实时性的要求。

关键词: 目标跟踪; Camshift 跟踪; 交比不变; 特征像素; 射影变换

中图分类号: TP391.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162404.0945

Camshift tracking based on constant cross ratio

HUANG Jin-ying, SONG Guo-hao*, LAN Yan-ting, WANG Ning, YANG Hang

(School of Mechanical and Power Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

* Corresponding author, E-mail: 1010057819@qq.com

Abstract: To optimize the tracking property of Camshift tracking method under a complex environment, the principle of constant cross ratio of internal feature pixels in tracked objects was used to improve the Camshift tracking method. By analyzing the tracked object model, the coordinate relationship among the internal feature pixels was calculated by using this method, then the internal datum's cross ratio invariant was regarded as the constraint condition of the proposed tracking method to correct the wrong tracking pixel points, and the distance ratio of internal feature pixels between two successive frames in the tracking process was taken as the judgment criteria. This proposed Camshift tracking method was used to test the video information respectively in a standard test video and in an actually shot video. Comparison results show that the distance deviation of the tracked object maintains within 15 pixel and the average handling time of single pixel is within 20 ms under the condition of two kinds of complex environment experiments. It concludes that the improved method has stable tracking property, higher tracking efficiency and good tracking results under the complex environment, and it satisfies the requirement of real-time tracking systems.

收稿日期: 2015-12-10; 修订日期: 2016-02-02.

基金项目: 山西省科技攻关项目 (No. 20130321005-04)

Key words: object tracking; Camshift tracking; constant cross ratio; feature pixel; project transformation

1 引言

障碍物探测是智能车辆的重点研究方向,而运动物体的识别与跟踪是障碍物探测的关键技术。如今,有关基于机器视觉技术对移动物体进行跟踪的研究越来越广泛^[1-7],其在商业、军事、航天等方面均展现出了不可或缺的作用。对于移动物体的常规检测方法主要有:帧间差分法、背景差分法、光流法等。常用的跟踪方法主要有基于区域的目标跟踪和基于特征的目标跟踪^[8-11]。在识别和跟踪移动物体时,复杂的环境严重影响了机器视觉的识别精度与跟踪效率。Meanshift 算法的提出,解决了单幅图像目标检测的难题,而 Bradski G R 提出的连续自适应的 Meanshift 算法(Camshift 算法)^[12-14],解决了连续多幅图像中的目标检测难题,推动了机器视觉的发展^[15-17]。由于 Camshift 算法是通过计算目标图像 HSV (Hues Saturation Value)空间下的颜色直方图实现目标的检测跟踪的,所以当被跟踪目标的颜色与背景颜色相近时,该方法会出现较大的跟踪误差,甚至丢失所跟踪的目标。针对 Camshift 算法的这一缺陷,很多学者研究了改进算法,如:文献[18]、[19]在 Camshift 算法中加入了 Kalman 预测器,当移动物体被遮挡时,Camshift 算法会结合预测器对目标运行轨迹进行预测,以保证所跟踪目标不丢失,但当目标被遮挡后改变运行轨迹,则该算法失效;文献[20]将主动视觉与跟踪算法相结合,使得跟踪设备可以随着目标的移动而发生角度变化,从而保证目标位于跟踪图像的最佳位置,但此方法对快速移动物体的跟踪效果不佳,设备的移动具有一定延迟;文献[21]将所跟踪目标进行特征分解,根据子目标间的相对位置进行检测跟踪,该方法较好地解决了目标的部分遮挡、旋转、平移、缩放等变化引起的定位问题,但其需要将一个目标分解为多个子目标进行计算,使得该算法的计算时间相对较长;文献[22]通过提取跟踪目标的背景与前景,来分析移动目标,但对颜色与背景相近的移动目标的跟踪效果不好。

本文提出了一种基于交比不变的 Camshift

跟踪方法,对跟踪目标进行模型建立,将模型中目标图像各特征像素间的相对位置作为后期检测跟踪的约束条件,通过标准测试视频与实际拍摄视频对本文方法进行实验验证,以验证该方法的可行性及实时跟踪目标的能力。

2 交比不变模型的几何表达

在射影变换中,有一个基本的不变量,称为交比不变量^[23],交比不变量可以用点列或线束来表示。

如图 1 所示,设 A、B、C、D 为直线上任意 4 点,定义 R 为交比:

$$R(A, B, C, D) = \frac{AC}{BC} : \frac{AD}{BD} \quad (1)$$

任意字母的两两组合表示为两点间的距离或两点射影坐标的差,交比是射影变换的不变量,则有以下定理。

定理 1:射影变换保持点列的交比不变

射影变换中,将直线 L_1 上的任意 4 点变换到直线 L_2 上,它们之间的关系为:

$$R(A, B, C, D) = R(A', B', C', D')$$

设平面中有两个线束 O 和 O',若它们所有对应线的交点共线,则称这两个线束的对应为中心射影,有限次中心射影的积称为线束间的射影变换。如图 2 所示。

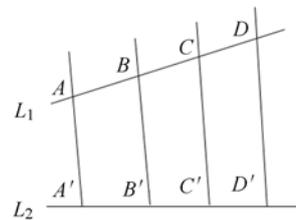


图 1 仿射变换

Fig. 1 Affine transformation

设 l_1, l_2, l_3, l_4 为线束 O 中任意 4 条直线,则定义交比 R 为:

$$R(l_1, l_2, l_3, l_4) = \frac{\sin(l_1, l_3)}{\sin(l_2, l_3)} : \frac{\sin(l_1, l_4)}{\sin(l_2, l_4)} \quad (2)$$

其中 (l_i, l_j) 表示直线 l_i 与直线 l_j 间的夹角。

由上述关系可得:

$$R(l_1, l_2, l_3, l_4) = R(A, B, C, D).$$

定理 2:射影变换保持线束的交比不变。

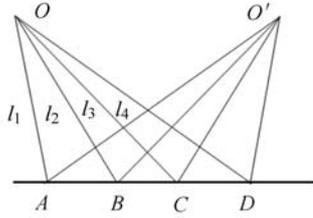


图 2 线束间的射影变换

Fig. 2 Projective transformation among wiring harness

3 基于交比不变的 Camshift 算法

将交比不变的性质应用在 Camshift 算法中,作为刚体移动时捕捉图像内部像素点坐标位置的约束条件。在检测出跟踪目标图像中的正确像素坐标后,通过交比不变原则对跟踪目标图像中定位错误的像素坐标进行校正,该方法可以有效地解决传统算法定位不精确的缺点。基于交比不变的 Camshift 算法目标跟踪的具体步骤如下:

$$\hat{q}_u = C_q \cdot \sum_{i=1}^n \exp \left[- \left(\frac{\sqrt{(x_i - x_c)^2 + (y_i - y_c)^2}}{h} \right)^2 \right] \cdot \delta[b(x_i, y_i) - u], \quad (5)$$

其中, $\delta[b(x_i, y_i) - u] = \begin{cases} 1, & b(x_i, y_i) = u \\ 0, & \text{else} \end{cases}$

C_q 为跟踪目标图像特征色调等级的显著性衡量指标:

$$C_q = 1 - \frac{\delta[b(x_i, y_i) - u]}{\sum_{i=1}^n \delta[b(x_i, y_i) - u]}. \quad (6)$$

表达式(5)中 h 为尺度参数, h 越小, 越能突出色调特征。

(3)对跟踪目标的像素坐标进行灰度值预测, 设跟踪目标中图像特征色调值为 u_i 的像素点对应的坐标为 (x_i, y_i) , 用 I 表示:

$$I(x_i, y_i) = \left\lfloor \frac{\hat{q}_u}{\max(\hat{q}_j \mid j = 1, 2, \dots, m)} \times 255 \right\rfloor, \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad (7)$$

式中符号 $\lfloor * \rfloor$ 为取整运算。

(4)根据第 3 步求得的灰度值,对跟踪目标图像定位窗口的零阶矩和一阶矩进行计算:

(1)根据所选目标区域两像素间的梯度值, 设模型图像中第 i 个像素的坐标为 (x_i, y_i) , $i = 1, 2, \dots, n$, 中心像素坐标为 (x_c, y_c) , 则两像素间的距离可表示为:

$$d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad i, j = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

模型图像中 n 个像素坐标间的距离矩阵为:

$$D_n = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \dots & d_{1n} \\ d_{21} & d_{22} & \dots & d_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ d_{n1} & d_{n2} & \dots & d_{nn} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

Camshift 算法利用 HSV 颜色空间建立直方图模型, 将跟踪目标的图像颜色直方图转换为颜色概率分布图。

(2)将跟踪的目标图像色调划分为 m 个等级, $b(x_i, y_i)$ 表示第 i 个像素坐标 (x_i, y_i) 处的色调特征值, 定义 U 为跟踪目标图像的特征色调值集: $U = \{u_i \mid i = 1, 2, \dots, m\}$, u 为特征色调值, 则跟踪的目标图像的色度直方图可表示为: $\hat{q} = \{\hat{q}_u \mid u = 1, 2, \dots, m\}$,

$$\begin{cases} M_{00} = \sum_{x_i} \sum_{y_i} I(x_i, y_i) \\ M_{10} = \sum_{x_i} \sum_{y_i} x_i I(x_i, y_i) \quad i, j = 1, 2, \dots, m. \\ M_{01} = \sum_{x_i} \sum_{y_i} y_i I(x_i, y_i) \end{cases} \quad (8)$$

(5)根据定位窗口的零阶矩和一阶矩, 计算定位窗口的质心坐标 (x_w, y_w) :

$$\begin{cases} x_w = \frac{M_{10}}{M_{00}} \\ y_w = \frac{M_{01}}{M_{00}} \end{cases}. \quad (9)$$

(6)对跟踪目标图像的定位窗口进行自适应边长调整, 其表达式如下:

$$S = 2 \sqrt{\frac{M_{00}}{256}}. \quad (10)$$

跟踪目标图像的定位窗口具有自适应的特性, 即定位窗口随着目标的变化而变化, 具有平移、旋转、缩放等自适应能力。通过设置目标图像

像素的中心坐标与定位窗口质心所对应的坐标之间的距离阈值,来评估定位窗口的自适应能力。当目标图像像素中心坐标与定位窗口质心坐标间的距离大于设定阈值时,则重复第(3)到第(6)步,直至达到预定要求。

(7)对跟踪目标图像中各像素点的坐标位置进行评定。设新的跟踪目标图像中的像素坐标为 (x_i', y_i') ,各像素坐标间的距离为 D_n' ,计算方法同步骤(1)。则新的跟踪目标图像各像素间的距离比与模型图像各像素间的距离比的比值:

$$e_{ij} = \frac{d'_{ij}}{d_{ij}} = \begin{cases} 1, & \frac{d'_{ij}}{d_{ij}} < \epsilon \\ 0, & \text{else} \end{cases}, \quad (11)$$

其中 ϵ 为设定的阈值,表示最大偏移误差。

若 $e_{ij} = 0$,则表示新的跟踪目标图像像素点定位错误,需要对其进行坐标位置校正。

(8)若目标图像连续两帧间的距离比大于设定的阈值时,即认为定位出错,同时对跟踪窗口内的像素距离比做一次遍历检查,对于不符合条件的像素点,通过交比不变原则进行校正,即将符合交比条件的点设置为特征点。假设跟踪的目标图像有 m 个像素点定位正确, n 个像素点定位错误。 r, s, t 为 m 个正确定位像素点中的 3 个随机的互异共线的像素点, v 为 n 个错误定位像素点中与 r, s, t 共线的像素点。 r, s, t, v 分别对应模型图像中第 1、2、3、4 四个像素点。则由定理 1 可得:

$$\frac{d_{13}}{d_{23}} : \frac{d_{14}}{d_{24}} = \frac{d_r}{d_s} : \frac{d_{rv}}{d_{sv}}. \quad (12)$$

根据交比不变原则,可以对 Camshift 算法错误定位的目标图像像素坐标点进行校正,将经过校正的像素点重复第(7)步操作,对校正后的像素点再次进行评估,若符合要求则进行下一步,否则,重复第(8)步。

(9)计算定位窗口的二阶矩:

$$\begin{cases} M_{11} = \sum_{x_i} \sum_{y_i} x_i y_i I(x_i, y_i) \\ M_{20} = \sum_{x_i} \sum_{y_i} x_i^2 I(x_i, y_i) \\ M_{02} = \sum_{x_i} \sum_{y_i} y_i^2 I(x_i, y_i) \end{cases} \quad i, j = 1, 2, \dots, m, \quad (13)$$

令

$$\begin{cases} a = \frac{M_{20}}{M_{00}} - x_w^2 \\ b = \frac{M_{11}}{M_{00}} - x_w y_w \\ c = \frac{M_{02}}{M_{00}} - y_w^2 \end{cases}, \quad (14)$$

则椭圆形定位窗口的长轴为:

$$L = \sqrt{\frac{(a+c) + \sqrt{b^2 + (a-c)^2}}{2}}, \quad (15)$$

椭圆形定位窗口的短轴为:

$$W = \sqrt{\frac{(a+c) - \sqrt{b^2 + (a-c)^2}}{2}}, \quad (16)$$

椭圆形定位窗口的方向角为:

$$\theta = \frac{1}{2} \arctan \left[\frac{b}{a-c} \right]. \quad (17)$$

(10)捕获下一帧定位窗口内的图像信息,返回第(2)步,计算新的跟踪目标图像像素点,直至完成各图像的识别与跟踪。

4 实验结果及分析

4.1 标准测试视频目标跟踪试验及分析

为了验证本文算法的可行性,分别采用传统 Camshift 算法、文献[22]所提出的算法以及本文算法对 PETS2000 标准测试库中的 test. mov 视频进行跟踪实验。视频分辨率为 768 pixel × 576 pixel,计算机配置为 i5-2450M,主频为 2.5 GHz,内存为 4G,算法运行环境为 VS2013。

本文首先对标准视频库中的灰色汽车进行跟踪,选取跟踪窗口的质心位置与跟踪目标的中心距离作为评判标准,并利用反向投影作为跟踪结果进一步说明。图 3 表示标准视频库中灰色小车的模型图像,椭圆形为跟踪目标区域。



图 3 灰色小车跟踪模型图

Fig. 3 Tracking model of gray car

图 4~6(彩图见期刊电子版)分别为 3 种算法对灰色小车模型的跟踪效果图。由彩色图可以看出,随着跟踪目标图像的更新,传统 Camshift 算法不能很好地将目标从背景颜色中区分出来,受背景颜色影响较大,不适用于复杂背景中的目标跟踪;文献[22]所提算法增强了目标的颜色特



(a) 第 32 帧
(a) The 32th frame



(b) 第 62 帧
(b) The 62th frame



(c) 第 80 帧
(c) The 80th frame



(d) 第 220 帧
(d) The 220th frame

图 4 Camshift 算法跟踪结果及反向投影图
Fig. 4 Tracking results of Camshift algorithm and reverse projection chart



(a) 第 32 帧
(a) The 32th frame



(b) 第 62 帧
(b) The 62th frame



(c) 第 80 帧
(c) The 80th frame



(d) 第 220 帧
(d) The 220th frame

图 5 文献[22]算法的跟踪结果及反向投影图
Fig. 5 Tracking results of literature[22] and its reverse projection chart



(a) 第 32 帧
(a) The 32th frame



(b) 第 62 帧
(b) The 62th frame



(c) 第 80 帧
(c) The 80th frame



(d) 第 220 帧

(d) The 220th frame

图 6 本文算法的跟踪结果及反向投影图

Fig. 6 Tracking results of proposed method and its reverse projection chart

征,可将目标从背景颜色中提取出来,当遇到与目标颜色相似的物体时,该算法将该物体也作为了跟踪目标,最后导致跟踪失败;本文算法在检测到目标物体颜色特征后,首先对跟踪模型进行分析,计算出模型各特征像素间的距离关系,利用交比不变原则对跟踪区域进行约束,从而保证了跟踪精度。右侧黑白图像为跟踪图像的反向投影图,表示投影颜色的概率分布,其中背景区域中的白色像素点表示与跟踪目标颜色特征相同的高概率像素点,从 3 幅图像可看出,传统 Camshift 算法在跟踪开始不久,就无法准确定位目标区域,文献[22]算法的跟踪效果较传统 Camshift 算法有所改进,但缺乏对搜索目标区域的约束,导致最终的跟踪结果有所偏差,本文算法为在传统 Camshift 算法中加入了交比不变约束,并将特征像素坐标间的距离比作为评判标准,使得跟踪的目标特征明显,基本不受背景影响,跟踪结果精确,这也证明了该方法的可行性。

表 1 为 3 种算法在上述 4 帧图像中自适应搜索得到的窗口质心位置与目标中心位置间的偏差,表 2 表示 3 种算法处理单帧图像所用的平均时间。从表中的数据可以得出,传统 Camshift 算法在第 80 帧时,基本已经丢失了目标;文献[22]算法在跟踪灰色目标时,虽偏差比较小,但最终却将其他物体误当成目标;本文算法由于以连续两帧目标图像的各特征像素间的距离比作为评定标准,并将被跟踪目标内部各特征像素坐标位置间的交比不变特性作为约束条件,所以对跟踪目标具有较好的响应结果,距离偏差都能保持在 10 pixel 以内。

对于运算时间,本文在传统 Camshift 算法的基础上增加了交比不变约束,故处理每一帧视频

表 1 灰色小车跟踪精度对比

Tab. 1 Tracking accuracy contrast of gray car (pixel)

	第 32 帧	第 62 帧	第 80 帧	第 220 帧
传统 Camshift 算法	26	37	56	82
文献[22]算法	7	15	11	14
本文算法	3	7	5	3

图像时,都比传统 Camshift 算法的用时多,而文献[22]算法需要分别提取每一帧视频图像的背景、前景等信息,用时最长。

表 2 灰色小车单帧平均运行时间对比

Tab. 2 Average running time contrast of single frame for gray car (ms)

	传统 Camshift 算法	文献[22]算法	本文算法
时间	10.2	20.4	15.7

4.2 实际实验结果及分析

为了进一步验证本文算法性能,对现实环境下的目标进行跟踪,视频图像的分辨率为 720 pixel×480 pixel,实验当天光照强度不高,实验背景环境较为复杂。图 7 为实际跟踪模型图,图 8、图 9、图 10 分别为传统 Camshift 算法、文献[22]算法、本文算法的跟踪效果图及反向投影图。

表 3 为实际跟踪实验中 3 种算法的跟踪窗口质心位置与跟踪目标中心位置间的偏差,表 4 为实际实验跟踪过程中单帧平均运行时间。



图 7 实际跟踪模型图

Fig. 7 Tracking model in actual experiment



(a) 第 24 帧

(a) The 24th frame



(b) 第 59 帧
(b) The 59th frame



(c) 第 81 帧
(c) The 81th frame



(d) 第 112 帧
(d) The 112th frame

图 8 Camshift 算法跟踪结果及反向投影图
Fig. 8 Tracking results of Camshift algorithm and its reverse projection chart



(a) 第 24 帧
(a) The 24th frame



(b) 第 59 帧
(b) The 59th frame



(c) 第 81 帧
(c) The 81th frame



(d) 第 112 帧
(d) The 112th frame

图 9 文献[22]算法跟踪结果及反向投影图
Fig. 9 Tracking results of literature[22] and its reverse projection chart



(a) 第 24 帧
(a) The 24th frame



(b) 第 59 帧
(b) The 59th frame



(c) 第 81 帧
(c) The 81th frame



(d) 第 112 帧
(d) The 112th frame

图 10 本文算法跟踪结果及反向投影图
Fig. 10 Tracking results of proposed method and its reverse projection chart

表 3 实际实验跟踪精度对比

Tab. 3 Tracking accuracy contrast of actual experiment

	(pixel)			
	第 24 帧	第 59 帧	第 81 帧	第 112 帧
传统 Camshift 算法	19	13	31	37
文献[22]算法	16	9	11	13
本文算法	14	6	3	2

表 4 实际实验单帧平均运行时间对比

Tab. 4 Average running time contrast of actual experiment

	(ms)		
	传统 Camshift 算法	文献[22]算法	本文算法
时间	10.8	22.1	14.4

从实验跟踪结果可知,虽然传统 Camshift 算法的单帧平均计算时间较少,但其在第 112 帧时,不能将目标图像与背景环境准确区分开,文献[22]算法与本文算法均能完成目标图像的准确跟

踪,但本文算法较文献[22]算法用时更少,3 种算法均能在 30 ms 内完成单帧图像的计算,满足实际运行情况下的实时性要求。

5 结 论

本文提出了一种基于交比不变的 Camshift 跟踪方法,将投影变换中交比不变原则作为被跟踪目标内各特征像素间的约束条件,对跟踪错误的像素点进行校正,并将跟踪过程中连续两帧目标图像内各特征像素之间的距离比作为评定标准。实验结果显示,该方法对复杂背景环境下的目标跟踪效果良好,跟踪性能稳定,跟踪过程中的单帧计算时间较短,两次实验单帧平均用时均小于 20 ms,符合实时跟踪对时间的要求;两次跟踪实验中,搜索窗口质心与被跟踪图像中心的偏差均小于 15 pixel,以较高的跟踪效率获得精确的跟踪结果。

参考文献:

- [1] WANG Z, YANG X, XU Y, *et al.*. CamShift guided particle filter for visual tracking[J]. *Pattern Recognition Letters*, 2009, 30(4): 407-413.
- [2] 程帅,孙俊喜,曹永刚,等. 增量深度学习目标跟踪[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(4): 1161-1170.
- [3] CHENG SH, SUN J X, CAO Y G, *et al.*. Target tracking based on incremental deep learning [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(4): 1161-1170. (in Chinese)
- [4] YIN M, ZHANG J, SUN H, *et al.*. Multi-cue-based CamShift guided particle filter tracking[J]. *Expert Systems with Applications*, 2011, 38(5): 6313-6318.
- [5] 李静宇,刘艳滢,田睿,等. 视频监控系统中的概率模型单目标跟踪框架[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(7): 2093-2099.
- [6] LI J Y, LIU Y Y, TIAN R, *et al.*. Probabilistic model single target tracking framework for video surveillance system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(7): 2093-2099. (in Chinese)
- [7] 谭立英,吴世臣,韩琦琦,等. 潜望镜式卫星光通信终端的 CCD 粗跟踪[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(2): 270-276.
- [8] TAN L Y, WU SH CH, HAN Q Q, *et al.*. Coarse tracking of periscope type satellite optical communication terminals[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(2): 270-276. (in Chinese)
- [9] 邓丹,吴谨,朱磊,等. 基于纹理抑制和连续分布估计的显著性目标检测方法[J]. *液晶与显示*, 2015, 30(1): 120-125.
- [10] DENG D, WU J, ZHU J, *et al.*. Significant target detection method based on texture inhibition and continuous distribution estimation [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2015, 30(1): 120-125. (in Chinese)
- [11] XU CH, GAO M, YANG Y. Accurate local region prediction by precise motion model in Kalman-particle filter [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(11): 3475-3482.
- [12] ZHANG Y Y, ZHAO X M, LI F J, *et al.*. Robust object tracking based on simplified codebook masked Camshift algorithm[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2015, 376494.
- [13] NHAT V Q, KIM S H, YANG H J, *et al.*. Real-time face tracking with instability using a feature-based adaptive model[J]. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 2015, 13(3): 725-732.

- [10] 修春波,魏世安.显著性直方图模型的 Camshift 跟踪方法[J]. 光学精密工程, 2015,23(6):1749-1757.
XIU CH B, WEI SH A. Camshift tracking with saliency histogram [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015,23(6):1749-1757. (in Chinese)
- [11] XIA J X, RAO W M, HUANG W, *et al.*. Automatic multi-vehicle tracking using video cameras: An improved Camshift approach[J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2013, 17(6): 1462-1470.
- [12] BRADSKI G R. Computer vision face tracking for use in a perceptual user interface[J]. *IEEE Trans Aerospace & Electronic Systems*, 1998:214-219.
- [13] 郭敬明,何昕,魏仲慧.基于在线支持向量机的 Mean Shift 彩色图像跟踪[J]. 液晶与显示, 2014, 29(1):120-128.
GUO J M, HE X, WEI ZH H. New mean shift tracking for color image based on online support vector machine[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2014,29(1):120-128. (in Chinese)
- [14] 杨一帆,田雁,杨帆,等.基于改进 Mean-Shift 算法的红外小目标跟踪[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(7):2164-2169.
YANG Y F, TIAN Y, YANG F, *et al.*. Tracking of infrared small-target based on improved Mean-Shift algorithm[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014,43(7):2164-2169. (in Chinese)
- [15] LOU Z, JIANG G, WU C. 2D scale-adaptive tracking based on projective geometry[J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2014, 72(1): 905-924.
- [16] ISHII I, TATEBE T, GU Q, *et al.*. Color-histogram-based tracking at 2000 fps[J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2012, 21(1):6553-6573.
- [17] DU G, ZHANG P, WANG X. Human-manipulator interface using particle filter[J]. *The Scientific World Journal*, 2014:1-12.
- [18] 刘明,赵孝磊.一种改进的 Camshift 目标跟踪算法[J]. 南京理工大学学报:自然科学版, 2013(5): 755-760.
LIU M, ZHAO X L. Target tracking based on improved Camshift algorithm[J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology*, 2013(5): 755-760. (in Chinese)
- [19] 闫钧华,陈少华,艾淑芳,等.基于 Kalman 预测器的改进的 CAMShift 目标跟踪[J]. 中国惯性技术学报, 2014, 22(4):536-542.
YAN J H, CHEN SH H, AI SH F, *et al.*. Target tracking with improved CAMShift based on Kalman predictor [J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2014, 22(4):536-542. (in Chinese)
- [20] 董恩增,闫胜旭,佟吉钢.基于主动视觉的人脸检测与跟踪算法研究[J]. 系统仿真学报, 2015, 27(5):973-979.
DONG E Z, YAN SH X, TONG J G. Research about method of face detection and tracking based on active vision[J]. *Journal of System Simulation*, 2015, 27(5):973-979. (in Chinese)
- [21] XIU C B, WEI S A, WAN R F, *et al.*. CamShift tracking method based on target decomposition[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2015:1-20.
- [22] LI D, XU L, GOODMAN E D, *et al.*. Integrating a statistical background-foreground extraction algorithm and SVM classifier for pedestrian detection and tracking[J]. *Integrated Computer-Aided Engineering*, 2013, 20(3): 201-216.
- [23] 马颂德,张正友.计算机视觉:计算理论与算法基础[M].北京:科学出版社,1998.1.
MA S D, ZHANG Z Y. *Computer Vision: Computational Theory and Algorithmic Base*[M]. Beijing: Science Press, 1998. 1. (in Chinese)

作者简介:



宋国浩(1990—),男,山东曲阜人,硕士研究生,2014年于中北大学获得学士学位,主要从事机械工程、机器视觉的研究。E-mail:1010057819@qq.com

导师简介:



黄晋英(1971—),女,山西代县人,教授,博士生导师,2010年于北京理工大学获得博士学位,主要从事智能车辆、检测与控制等方面的研究。E-mail:ylbhjy@qq.com