

文章编号 1004-924X(2013)09-2364-07

# 采用改进 Mean Shift 算法的移动机器人行人跟踪

王丽佳<sup>1,2</sup>, 贾松敏<sup>1\*</sup>, 王 爽<sup>1</sup>, 李秀智<sup>1</sup>

(1. 北京工业大学 电子信息与控制工程学院, 北京 100124;

2. 河北工业职业技术学院 信息工程与自动化系, 河北 石家庄 050000)

**摘要:** 为了提高移动机器人目标跟踪系统在复杂环境中的跟踪性能, 提出在双层定位机制下采用基于自适应核函数的 Mean Shift 算法实现目标跟踪。利用射频识别器件(RFID)检测携带标签的目标, 实现外层粗定位并确定感兴趣区域(ROI); 在内层则根据对视差图的 ROI 的处理结果确定初始搜索窗口, 然后应用基于自适应核函数的 Mean Shift 算法在从立体相机获得的左图中应用基于自适应核函数的 Mean Shift 算法实现对目标的精确定位。自适应核函数由目标的区域特征与 Epanechnikov 函数相融合构成, 克服了目标边缘处背景像素对目标颜色概率分布的影响。与传统的 Mean Shift 算法相比, 所提方法在同色背景干扰下仍能准确跟踪目标。另外, RFID 限定了图像搜索范围, 节省了运算开支, 图像处理的平均时间为 62.11 ms/frame, 满足实时跟踪的要求。实验结果表明, 该方法可实现移动机器人在同色背景干扰、遮挡、目标快速移动等情况下的目标跟踪。

**关键词:** 移动机器人; 行人跟踪; 双层定位机制; 自适应核函数; Mean Shift 算法; 射频识别器件

**中图分类号:** TP242.6; TP391.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132109.2364

## Person tracking of mobile robot using improved Mean Shift

WANG Li-jia<sup>1,2</sup>, JIA Song-min<sup>1\*</sup>, WANG Shuang<sup>1</sup>, LI Xiu-zhi<sup>1</sup>

(1. *College of Electronic Information and Control Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;*

2. *Department of Information Engineering and Automation, Hebei College of Industry and Technology, Shijiazhuang 050000, China)*

*\* Corresponding author, E-mail: jsm@bjut.edu.cn*

**Abstract:** To improve the performance of person tracking for a mobile robot in complex environments, an adaptive kernel function based Mean Shift algorithm was proposed by using a coarse to fine localization mechanism. In the outer layer, a Radio Frequency Identification Device (RFID) was adopted to detect the person with an ID tag to determine the Region of Interest (ROI) coarsely. In the inner layer, the ROI of a disparity image was processed to estimate an initial searching window. Then, the adaptive kernel based Mean Shift algorithm was applied to location of the person precisely in the left image from a stereo camera. The adaptive kernel function was combined with the regional feature of person and the Epanechnikov function, which can reduce the effect of the background pixel on the tar-

**收稿日期:** 2013-03-13; **修订日期:** 2013-05-03.

**基金项目:** 北京市自然科学基金重点项目(No. KZ201110005004); 国家自然科学基金资助项目(No. 61175087, No. 61105033); 国家教育部留学回国人员科研启动基金资助项目(第 40 批)

get's color probability distribution. Compared with the traditional Mean Shift algorithm, the presented algorithm can track the target successfully when the background has the same color. Furthermore, the searching area is narrowed by the RFID, so that the computational cost is reduced. The average computing time is 62.11 ms/frame, which satisfies the requirements of real-time target tracking. The experimental results indicate that the proposed tracking method can complete the target tracking in a background with the same color, short-term occlusion, fast moving, and a sudden turn for a mobile robot.

**Key words:** mobile robot; person tracking; coarse to fine localization mechanism; adaptive kernel function; Mean Shift algorithm; Radio Frequency Identification Device(RFID)

## 1 引言

双目立体视觉能够提供目标的三维位置信息和目标与观察者之间的距离<sup>[1]</sup>,因此被广泛应用于移动机器人目标跟踪中<sup>[2-3]</sup>。目前大部分基于视觉的移动机器人利用颜色特征跟踪目标<sup>[1,4]</sup>。Mean Shift 是常用的颜色跟踪算法,它通过最大化 Bhattacharyya 系数搜索跟踪窗口<sup>[5]</sup>。然而,当存在同色物体干扰、目标快速移动以及遮挡时,该方法的跟踪效果不太理想<sup>[6]</sup>。颜佳<sup>[7]</sup>等在跟踪窗口内利用协方差矩阵主分量分析法计算目标的方向和尺寸大小,然后将相似性度量和卡尔曼滤波器相联合以更新跟踪窗口的大小和方向倾角。刘宁夏等<sup>[8]</sup>利用前  $N$  帧的位置对目标进行运动预测,进而确定初始搜索窗口的位置和大小,实现了目标快速移动时的跟踪。Amir<sup>[9]</sup>提出一种新的凸核函数以降低跟踪窗口边缘处的权值,解决了部分遮挡以及同色物体干扰情况下的目标跟踪问题。刘士荣等<sup>[4]</sup>通过自适应地扩展搜索窗口改进 CamShift 算法,解决了目标快速移动而引起的“跟丢”问题。

基于视觉技术的移动机器人目标跟踪面临的另一个问题是当目标突然转弯以致在相机视野中消失时,跟踪失败。RFID 具有非视距数据通信、标签 ID 唯一等特点。Jia 等<sup>[10]</sup>利用其标签 ID 唯一性特点并与相机相结合,实现了室内移动机器人的自定位。Ouadah 等<sup>[11]</sup>利用 RFID 辅助机器人进行物体识别,并分别建立基于 RFID 和立体视觉控制策略。本文将 RFID 引入到移动机器人目标跟踪系统中,除辅助机器人完成目标跟踪外,当目标消失在相机视野外时,可以为移动机器人提供导向,引导机器人快速跟随目标。

本文提出基于自适应核函数的 Mean Shift 算法,并将其应用于移动机器人的目标跟踪系统中。该方法将目标的区域特征与 Epanechnikov 函数融合构造自适应核函数,降低了目标边缘处背景像素对目标颜色概率分布的影响。对于移动机器人的目标跟踪,采用双层定位机制:在外层,RFID 系统通过检测携带标签的目标进行粗定位并确定 ROI;在内层则通过在 ROI 内进行图像处理获得目标的精确位置。该系统将对视差图 ROI 的预处理结果作为 Mean Shift 算法的初始搜索窗口,以解决目标快速移动时的跟踪问题。当目标突然转弯以致在相机视野中消失时,根据外层的粗定位结果引导机器人快速跟踪目标。发生遮挡时,通过扩展卡尔曼滤波(Extended Kalman Filter, EKF)预测目标位置。

## 2 基于核函数的 Mean Shift 算法

基于核函数的 Mean Shift 算法常用于对颜色特征的跟踪,它是一种基于核密度估计的无参快速模式匹配算法,通过迭代算法进行目标定位。在目标跟踪中,手动选择一个矩形区域或椭圆区域表示目标。设目标区域像素坐标为  $\{x_i^*\}_{i=1,\dots,n}$ ,  $n$  为像素点个数,则目标的颜色概率分布表示为:

$$q_u = C \sum_{i=1}^n k(\|x_i^*/h\|^2) \delta[b(x_i^*) - u], \quad (1)$$

式中:  $b(x_i^*)$  是  $R^2 \rightarrow \{1, \dots, m\}$  映射函数,  $\delta$  是使  $\sum_{u=1}^m \delta[x] = 1$  的 delta 函数,  $k$  是核函数,为保证算法收敛,常选凸函数:高斯核函数或 Epanechnikov 核函数,  $C$  为归一化系数,由下式计算:

$$C = 1 / \sum_{i=1}^n k(\|x_i^*\|^2). \quad (2)$$

在当前帧图像中,以空间点  $y$  为中心的候选图像区域内像素点  $\{x_i\}_{i=1,\dots,n_h}$  的颜色概率分布为:

$$P_u(y) = C_h \sum_{i=1}^{n_h} k(\|(y-x_i)/h\|^2) \delta[b(x_i)-u], \quad (3)$$

式中:  $C_h = 1 / \sum_{i=1}^{n_h} k(\|(y-x_i)/h\|^2)$ ,  $h$  为带宽。

基于核函数的目标跟踪算法的基本思想是对每一帧图像做 Mean Shift 运算,并将当前帧得到的搜索窗大小和质心作为下一帧搜索窗口的初始值,如此迭代实现对目标的连续跟踪。算法过程为:

(1)在第一帧手动初始化目标窗口的大小和位置;

(2)按照公式(1)计算目标的颜色概率分布;

(3)读取下一帧图像,移动窗口的中心到质心位置,初始化搜索窗口的位置和大小;

(4)按照公式(3)计算候选目标的颜色概率分布;

(5)调用 Mean Shift 过程,根据公式(4)计算新搜索窗口的位置和大小;

$$y_1 = \sum_{i=1}^{n_h} x_i \omega_i g\left(\left\|\frac{y-x_i}{h}\right\|^2\right) / \sum_{i=1}^{n_h} \omega_i g\left(\left\|\frac{y-x_i}{h}\right\|^2\right), \quad (4)$$

式中:  $g(x) = -k'_E(x)$ , 当选 Epanechnikov 核函数时,  $g(x) = 1$ 。  $\omega_i$  为当前图像区域内各点的权重,由下式计算:

$$\omega_i = \sum_{u=1}^m \sqrt{\frac{q_u}{p_u(y)}} \delta[b(x_i)-u]. \quad (5)$$

(6)若  $\|y_1 - y\| < \epsilon$  则停止搜索,否则将  $y_1$  代替  $y$  跳转到(5)继续迭代,直到跟踪结束。

基于核函数的 Mean Shift 算法在移动机器人目标跟踪系统中取得了良好的跟踪效果。然而,该方法利用区域内的颜色信息对目标进行跟踪,当区域背景与目标颜色相同时会导致区域发散以致跟踪失败。另外,该算法适用于目标在相邻两帧图像间的偏移量较小时的跟踪,当目标快速移动以致在相邻两帧图像间的偏移量较大时,算法容易陷入局部最优值而发生误跟踪<sup>[9]</sup>。同时,第(1)步中手动框选目标降低了系统的灵活性

和自适应性。最后,在基于视觉的目标跟踪系统中,当目标突然转弯以致消失在相机视野中时会使跟踪失败。

### 3 自适应核函数的构造

Epanechnikov 是各向同性核函数,常被用于基于核函数的 Mean Shift 算法中<sup>[12]</sup>,该核函数由下式计算:

$$k(x) \propto \begin{cases} 1-x, & 0 \leq x \leq 1 \\ 0, & x > 1 \end{cases}. \quad (6)$$

通过 Epanechnikov 核函数对目标区域像素进行加权,建立加权直方图。基于 Epanechnikov 核函数的 Mean Shift 算法根据该权值图像对目标进行跟踪。权值大的地方为目标最可能出现的区域,权值图像的特点决定着 Mean Shift 算法的收敛性。当目标与背景颜色相似度较高时,目标边缘处的背景像素权值与目标边缘权值相同。通过 Epanechnikov 核函数建立起来的目标边缘处的加权直方图与其附近的背景区域的加权直方图相近,从而对跟踪结果造成干扰。

为了克服背景对目标跟踪结果的影响,将 Epanechnikov 核函数与候选目标区域相融合构造自适应核函数,如图 1 所示。移动机器人行人跟踪系统的目标是保持人机距离为 2 m,故目标出现在视差范围为 1~3 m 的区域内。通过视差范围限定去除视差范围外的背景。对消除背景后的视差图进行周长滤波,以去除周长小于给定阈值的非行人目标。然后对提取的前景行人目标的轮廓内部进行无差别填充。通过膨胀、腐蚀等形态学处理方法和连通性分析方法获得表面更平滑、质量更高的行人侧影<sup>[13]</sup>。最后根据人体形态学原理确定行人的躯干区域,以获得目标区域的二值化掩图:

$$BM(x_i) = \begin{cases} 1 & \text{if } x_i \in \text{foreground} \\ 0 & \text{if } x_i \in \text{background} \end{cases}. \quad (7)$$

然后,Epanechnikov 核函数与二值化掩图做点乘得到自适应核函数:

$$k_{\text{new}}(\|(y-x_i)/h\|^2) = k(\|(y-x_i)/h\|^2) \times BM(x_i). \quad (8)$$

根据新的自适应核函数构造行人躯干区域的颜色直方图,利用 Mean Shift 算法实现对行人目标的跟踪。自适应核函数在目标边缘处背景像素

点的核函数值为 0,故其对背景像素点的加权权值为 0,由此产生的背景像素的颜色加权直方图为 0。在目标像素点处自适应核函数的函数值与 Epanechnikov 核函数的函数值相等。与背景像素点的加权权值相比,自适应核函数对目标像素点的加权权值较大。根据自适应核函数构造目标的加权颜色直方图与核函数的函数值有关。因此,新的自适应核函数克服了同色背景对目标跟踪的干扰。

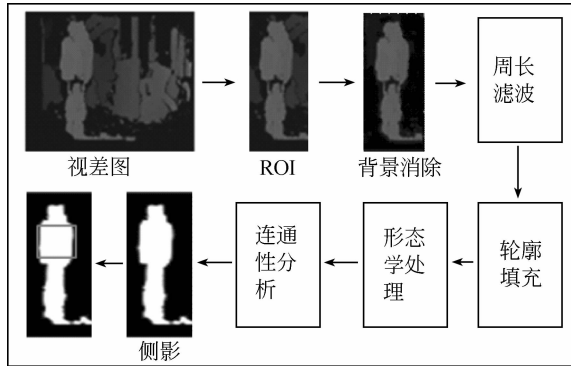


图 1 自适应核函数构造示意图

Fig. 1 Illustration of constructing adaptive kernel function

### 4 移动机器人的行人跟踪方法

移动机器人目标跟踪系统在同色背景干扰、目标快速移动、遮挡以及目标突然转弯等情况下的跟踪性能显著下降。为解决这一问题,本文利用 RFID 和立体视觉传感器在双层定位机制下采用基于自适应核函数的 Mean Shift 算法实现目标跟踪。硬件平台采用 Pioneer3-DX 型移动机器人,机器人上装有立体视觉系统和 RFID 系统,如图 2 所示。立体视觉系统由 2 台 Point Grey 公司的 FLEA2 相机搭建而成,相机成像的最大分辨率为  $1\ 024 \times 768$ ,焦距为 3.5 mm。RFID 系统包括两根 8DBi 圆极化天线、读卡器、和标签。

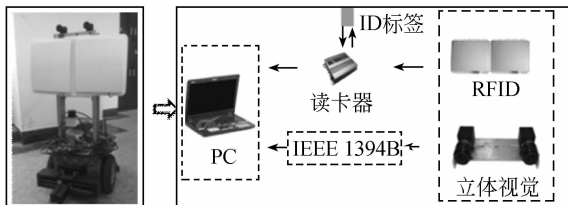


图 2 实验平台

Fig. 2 Experiment platform

通过对从 RFID 系统和立体视觉系统获得的场景信息进行处理实现目标跟踪,从而引导机器人跟随目标。移动机器人目标跟踪的流程如图 3 所示。其中自启动阶段包括目标识别及目标模板的初始化,采用改进的步态光流图并结合视角识别目标<sup>[13]</sup>,识别成功后自动初始化其衣服颜色模板。步态识别是指根据人的走路姿势进行身份识别。步态具有独特性、非侵犯性、难伪装性、远距离可识别等优点。将其用于机器人目标跟踪系统的自启动阶段完成了颜色模板的初始化,同时克服了人脸识别中目标必须面向机器人的缺陷。

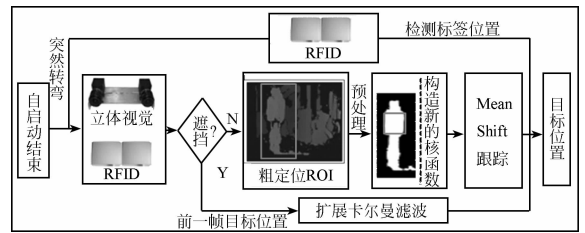


图 3 跟踪算法流程图

Fig. 3 Flowchart of tracking algorithm

完成自启动后进入目标跟踪阶段。首先 RFID 系统对携带标签的目标进行识别以完成外层的粗定位<sup>[11]</sup>。RFID 系统的读卡器和天线安装在机器人上,目标携带标签在机器人前面行走,RFID 系统通过检测标签对目标进行识别。当携带标签的目标进入读卡器的工作范围时,其天线产生感应电流,标签获得能量被激活并向读卡器发送自身编码等信息。根据每根天线获得信号强弱判断目标方位,同时依据读卡器和标签之间的信号到达时间延迟估计目标与机器人之间的距离,从而完成目标的粗定位。

完成外层粗定位后,对从立体视觉获得的图像信息进行处理实现对目标的内层精确定位。首先,从立体视觉系统获得包含场景三维信息的视差图,根据外层粗定位结果确定视差图中的 ROI。然后,对视差图的 ROI 进行预处理以获得目标侧影。根据形态学原理从运动目标侧影获得躯干区域信息,并构造自适应核函数,同时用躯干区域初始化搜索窗口。最后,在从立体相机获得的左图上采用基于自适应核函数的 Mean Shift 算法实现目标的精确定位。当目标消失在相机视野之外时,RFID 系统仍然能检测到携带标签的目标,为机器人提供导向,使其快速跟踪目标。当目标被

遮挡时,RFID 无法检测到标签信号使内外层定位均失效,系统利用 EKF 预测目标位置。该方法从 RFID 和立体视觉系统获得初始搜索窗口,解决了目标快速运动时的“跟丢”问题。同时自适应核函数将目标的区域信息和 Epanechnikov 核函数相结合,克服了同色背景的干扰。

## 5 实验结果及分析

为了验证本文所提方法的有效性,对本文改进的 Mean Shift 算法与传统的 Mean Shift 算法的目标跟踪进行对比。传统算法的跟踪结果如图 4 所示,目标边缘处的背景像素以一定的权值参与到目标颜色概率分布的计算,同色背景造成误跟踪。当目标移动到第 33 帧位置时,传统 Mean Shift 算法跟踪到与目标衣服颜色相近的背景。本文所提方法的跟踪结果如图 5 所示,通过将候选目标区域特征与 Epanechnikov 核函数相融合构造自适应核函数,使目标边缘处的背景像素权值为 0,克服了同色背景对目标跟踪的影响。

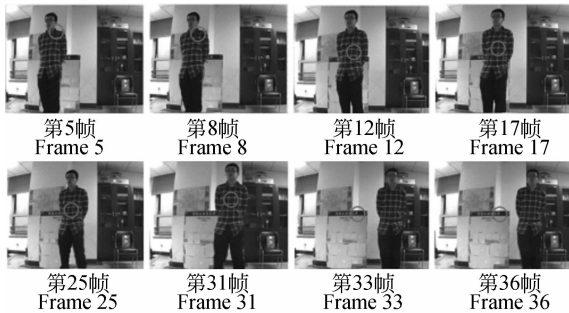


图 4 采用传统 Mean Shift 算法的目标跟踪结果  
Fig. 4 Tracking results using traditional Mean Shift algorithm

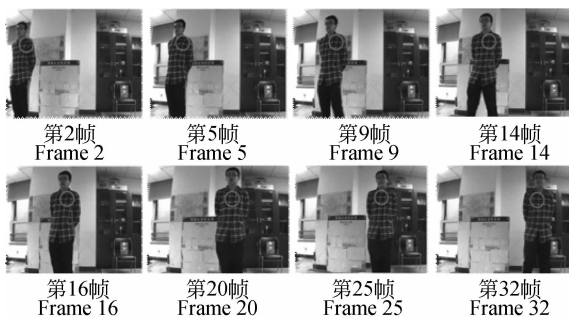


图 5 采用改进 Mean Shift 算法的目标跟踪结果  
Fig. 5 Tracking results using improved Mean Shift algorithm

图 6 是采用本文所提方法的移动机器人目标跟踪结果。第 33 帧目标被其他非目标人体遮挡,RFID 无法检测到标签信号,机器人根据 EKF 预测的目标位置跟随目标。第 41 帧目标突然转弯,机器人根据 RFID 提供的粗定位结果,快速转弯以跟随目标。RFID 限定了目标的搜索范围,节省了运算开支,图像处理的平均时间为 62.11 ms/frame,满足机器人目标跟踪的实时性要求。

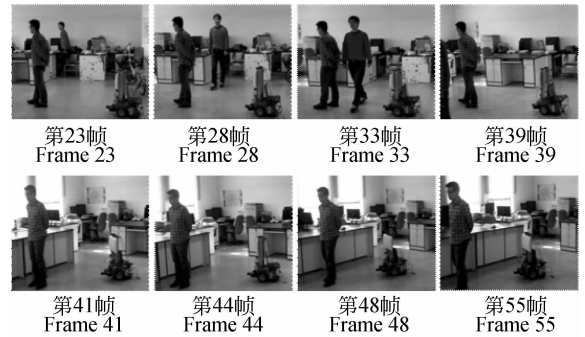


图 6 移动机器人目标跟踪结果  
Fig. 6 Tracking results of mobile robot

## 6 结 论

本文将基于自适应核函数的 Mean Shift 算法用于移动机器人的目标跟踪系统中。通过将目标的区域特征与 Epanechnikov 函数相结合构造自适应核函数,克服同色背景对目标颜色概率分布的影响。根据从 RFID 和立体视觉传感器获得的场景信息,提出双层定位机制下的目标跟踪方法。将 RFID 的粗定位结果作为感兴趣区域,使得图像处理的平均时间为 62.11 ms/frame,节省了运算开支,满足了机器人实时跟踪的要求。同时,当目标突然转弯以致消失在相机视野中时,RFID 为机器人跟随目标提供位置导向。另外,用 ROI 预处理结果初始化 Mean Shift 算法的搜索窗口,解决了目标快速移动时的“跟丢”问题。最后,当发生遮挡时,EKF 预测目标位置。实验结果表明本文所提方法能有效解决移动机器人目标跟踪中的同色背景干扰、目标快速移动、遮挡、以及目标突然转弯等问题。

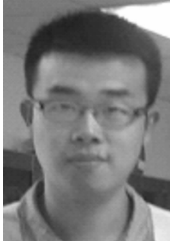
## 参考文献:

- [1] 张娟, 潘建寿, 吴亚鹏, 等. 基于双目视觉的运动目标跟踪与测量[J]. 计算机工程与应用, 2009, 45(25): 191-194.  
ZHANG J, PAN J SH, WU Y P, *et al.*. Tracking and measurement of moving object in binocular stereo vision [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2009, 45(25): 191-194. (in Chinese)
- [2] TAKEMURA H, ZENTARO N, MIZOGUCHI H. Development of vision based person following module for mobile robots in/out door environment [C]. *Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, Guilin, China, December 19-23, 2009*: 1675-1680.
- [3] 沈志华, 赵英凯, 王晓荣, 等. 全自主机器人双目视觉运动检测研究[J]. 计算机测量与控制, 2006, 14(1): 26-27.  
SHEN ZH H, ZHAO Y K, WANG X R, *et al.*. Research on ios-vision system of autonomous mobile robot for motion detection [J]. *Computer Measurement & Control*, 2006, 14(1): 26-27. (in Chinese)
- [4] 刘士荣, 孙凯, 张波涛, 等. 基于改进 Camshift 算法的移动机器人运动目标跟踪[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2011, 39(S2): 223-226.  
LIU SH R, SUN K, ZHANG B T, *et al.*. Mobile robot moving object tracking based on modified Camshift algorithm [J]. *J. Huazhong Univ. of Sci. & Tech.: Natural Science Edition*, 2011, 39(S2): 223-226. (in Chinese)
- [5] 薛陈, 朱明, 陈爱华. 鲁棒的基于改进 Mean-shift 的目标跟踪[J]. 光学精密工程, 2010, 18(1): 234-239.  
XUE CH, ZHU M, CHEN AI H. Robust object tracking based on improved Mean-shift algorithm [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(1): 234-239. (in Chinese)
- [6] 董蓉, 李勃, 陈启美. 基于 SIFT 特征的目标多自由度 Mean Shift 跟踪算法[J]. 控制与决策, 2012, 27(3): 399-407.  
DONG R, LI B, CHEN Q M. Multi-degree-of-freedom mean-shift tracking algorithm based on SIFT feature [J]. *Control and Decision*, 2012, 27(3): 399-407. (in Chinese)
- [7] 颜佳, 吴敏渊, 陈淑珍, 等. 跟踪窗口自适应的 Mean Shift 跟踪[J]. 光学精密工程, 2009, 17(10): 2606-2611.  
YAN J, WU M Y, CHEN SH ZH, *et al.*. Mean Shift tracking with adaptive tracking window [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(10): 2606-2611. (in Chinese)
- [8] 刘宁夏, 丁显廷, 孙明竹, 等. 基于 Camshift 与活动轮廓模型的细胞追踪方法 [C]. *Proceeding of the 31st Chinese Control Conference, Hefei, China, July 25-27, 2012*: 3656-3661.
- [9] LIU N X, DING X T, SUN M ZHU, *et al.*. Cells tracking based on Camshift and active contour model [C]. *Proceeding of the 31st Chinese Control Conference, Hefei, China, July 25-27, 2012*: 3656-3661. (in Chinese)
- [10] AMIR H M, ARASH A L. Applying mean shift, motion information and Kalman filtering approaches to object tracking [J]. *ISA Transactions*, 2012, 51: 485-497.
- [11] JIA S M, LIN W G, WANG K ZH, *et al.*. Network distributed multi-functional robotic system supporting the elderly and disabled people [J]. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 2006, 45: 53-76.
- [12] OUADAH N, CADENAT V, LERASLE F, *et al.*. Multi-sensor-based control strategy for initiating and maintaining interaction between a robot and a human [J]. *Advanced Robotics*, 2011, 25: 1249-1270.
- [13] COMANICIU D, MEER P. Mean shift: a robust approach toward feature space analysis [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2002, 24(5): 603-619.
- [14] 贾松敏, 王丽佳, 王爽, 等. 改进的步态光流图与视角相结合的身份识别 [J]. 光学精密工程, 2012, 20(11): 2500-2507.  
JIA S M, WANG L J, WANG SH, *et al.*. Person identification combining modified gait flow image and view [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(11): 2500-2507. (in Chinese)

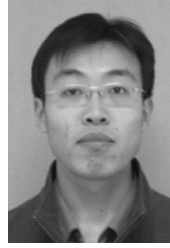
## 作者简介:



王丽佳(1981—),女,河北承德人,博士研究生,讲师,2008年于郑州大学获得硕士学位,主要从事智能机器人导航、机器视觉等方面的研究。E-mail: wanglijia\_198111103@163.com



王爽(1989—),男,北京人,硕士研究生,2011年于北京工业大学获得学士学位,主要从事智能系统与模式识别等方面的研究。E-mail: wangshuang89@gmail.com



李秀智(1979—),男,山东冠县人,讲师,硕士生导师,2008年于北京航空航天大学获得博士学位,主要从事智能机器人导航、机器视觉等方面的研究。E-mail: xiuzhi.lee@163.com



贾松敏(1964—),女,北京人,教授,博士生导师,2002年日本国立电气通信大学博士,主要从事智能服务机器人及其关键性技术、机器人分散控制、计算机视觉等方面的研究。E-mail: jsm@bjut.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)