# 一种融合ViBe与多特征提取的微动目标检测算法

杨春德 孟 琦
(重庆邮电大学计算机科学与技术学院 重庆 400065)

**摘 要** 为实现前景微动目标的准确提取,克服提取过程中的高误检率等难题,对CbCr分量、RGB和SILTP特征建立背景模型,提出一种融合多特征的ViBe背景建模改进算法。首先引入LBSP算子,改进LBP-TOP纹理编码方式,利用得到的纹理特征计算当前帧的时/空域前景概率,从而建立起接近真实背景的CbCr背景模型;然后结合局部像素复杂度和3种特征的变化情况改进ViBe判别与更新方法,利用背景减除和形态学处理得到完整的前景目标进行背景替换。实验结果表明,所提算法能有效分割视频图像中的微动目标并实现背景替换。

**关键词** ViBe,SILTP,LBP-TOP,LBSP,背景替换
**中图法分类号** TP391.41 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2017.02.053

## Algorithm of Micro-motion Object Detection Based on ViBe and Multi-feature Extraction

YANG Chun-de MENG Qi
(College of Computer Science and Technology, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

**Abstract** In order to realize the accurate extraction of micro-motion object and overcome problems like high false detection rate in the target extraction process, this paper etablished background model for CbCr component, RGB and SILTP feature, and proposed an improved algorithm of ViBe background modeling based on fusion of multi features. The algorithm improvs LBP-TOP texture operator encoding method by introducing LBSP operator, and generates the spatial and temporal domain foreground probability of a pixel by utilizing the improved LBP-TOP texture feature, which is used to gradually establish a CbCr background model close to the true background. It improves ViBe foreground determination and background updating method based on the local pixel complexity and the changing conditions of the three types of characteristics. Then, it gets the complete object detection and accomplishs the accurate background replacement of the video sequences. The experimental results show that the proposed algorithm can effectively segment the micro motion-object of the video sequences and realize the background replacement.

**Keywords** ViBe, SLITP, LBP-TOP, LBSP, Background replacement

随着互联网技术的进一步发展和4G网络的普及,人们对远程视频服务的要求越来越高,如在视频会议、视频通讯、远程视频应急指挥调度、远程视频教学以及远程视频客户业务解说与产品推销等情况下,人们要求其更加人性化、智能化以及更具可信度,不仅要求视频能够呈现清晰的场景画面,更希望通过实时的背景更新替换,为人们思考与决策提供辅助参考,同时能有效滤去无关背景,保护个人隐私。

背景建模作为目标检测中一种常用的基本方法,被广泛应用于视频监控系统中。近年来国内外学者提出了不少有关背景建模的方法,如Kim等人提出了基于码本(Codebook)的背景建模方法;Barnich O[1]提出了一种基于像素点的新型背景建模方法,即ViBe;李加佳等人[2]提出了一种基于LBP纹理特征的运动目标检测方法;Xu H等人[3]在融合了SILTP与RGB特征的基础上,提出了一种改进的ViBe背景建模方法。但是这些方法在目标提取的准确性与完整性方面都存在缺陷。

针对上述算法的不足,本文提出一种融合多特征的ViBe改进算法。该算法采用改进的纹理特征计算前景概率,对YCbCr空间中的色度分量在时空域建立背景模型,同时计算空间域下各像素在纹理算子标定区域内的复杂度,并将该复杂度加入背景模型中。为当前帧图像的RGB和SILTP特征建立背景模型,根据模型中3种特征在目标检测过程中的变化情况以及像素复杂度,来改变ViBe背景更新和前景检测时所使用的阈值,有效提高了目标检测的提取精度,同时减小了光照带来的影响。

## 1 多特征背景模型的建立

基于单一特征建立的背景模型很难做到准确的背景描述,从而导致目标分割效果较差。本文同时对像素和纹理这两种类型特征建立背景模型,消除彼此的缺陷,在最大程度上利用其优势进行目标的分割提取。

### 1.1 时空域下的纹理特征

赵国英等人于2007年通过对时空域动态纹理分析,提出基于XY,XT与YT三正交平面的LBP-TOP(Local binary patterns form Three Orthogonal Planes)算子,具体模型如图

到稿日期:2016-02-22 返修日期:2016-07-20 本文受重庆市高校优秀成果转化资助项目(KJZH14219)资助。
杨春德(1964—),男,教授,主要研究方向为数字图像处理、信息与计算理论;孟 琦(1991—),男,硕士生,主要研究方向为数字图像处理。

1 所示。XY-LBP 反映了图像的空间信息，XT-LBP 与 YT-LBP 反映了时域空间下图像的运动信息，LBP-TOP 算子有效地描述了视频图像的全局纹理特征，Lizarraga-Morales R A 等人[4]证明 LBP-TOP 算子能有效处理视频图像。Bilodeau G A 等人[5]于 2013 年提出了一种新的二进制纹理特征描述算子 LBSP(Local Binary Simolarity Patterns)，其编码邻域如图 2 所示。

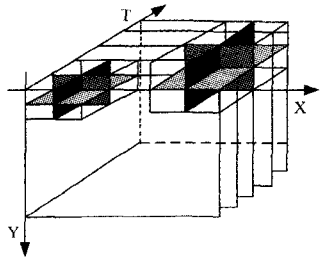


图 1 动态纹理中的三平面邻近点

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| $g_9$ | | $g_{10}$ | | $g_{11}$ |
| | $g_1$ | $g_2$ | $g_3$ | |
| $g_{16}$ | $g_8$ | $g_c$ | $g_4$ | $g_{12}$ |
| | $g_7$ | $g_6$ | $g_5$ | |
| $g_{15}$ | | $g_{14}$ | | $g_{13}$ |

图 2 LBSP 编码邻域

通过 $R$ 区域中像素 $g_i$ 与中心像素 $g_c$ 的比较得到一组二进制编码作为 LBSP 特征值，如式(1)和式(2)所示：

$$LBSP_R(x_C,y_C)=\sum_{i=0}^{L-1}d(g_i-g_c)2^p \tag{1}$$

$$d(x)=\begin{cases}1, & |x|\leqslant T_d\\ 0, & |x|>T_d\end{cases} \tag{2}$$

其中，$T_d$ 为相似阈值。通常 $R$ 取 5，$L$ 取 16，得到 LBSP 是一个 16 位的二进制数。

Stcharles P L 等人[6]证明 LBSP 算子具有较高的特征描述准确性，因此本文将其引入 LBP-TOP 编码中，改进时空域纹理特征描述方式，提高纹理特征描述精度。本文提出的时空域下的纹理特征描述为：

$$LBSP_R(x_C,y_C)=\sum_{i=0}^{L-1}d(g_i-T_c)2^p \tag{3}$$

$$d(x)=\begin{cases}1, & |x|\leqslant 0\\ 0, & |x|>0\end{cases} \tag{4}$$

为了加强纹理特征的区域相关性，本文在式(3)中引入阈值 $T_c$ 代替 $g_c$，$T_c$ 为使用 LBSP 编码区域中局部均值 $m$ 与标准差 $s$ 计算得到的门限值，如式(5)所示：

$$T_c=m+k*s \tag{5}$$

本文根据 N-LBP 算法对不同区域自适应地设定 $k$ 值，增强局部光照适应能力。$k$ 定义为：

$$k=\begin{cases}-\dfrac{1}{5(1+e^{1-L})}, & 0<L\leqslant 1\\ -\dfrac{1}{10(1+e^{L-1})}, & 1<L<2\\ \dfrac{1}{10(1+e^{L-2})}, & L\geqslant 2\end{cases} \tag{6}$$

其中，$L=m/s^2$，$m$ 和 $s^2$ 分别是 $g_c,g_1,\cdots,g_{16}$ 集合的均值和方差。当 $0<L\leqslant 1$ 时，局部光照不足；当 $1<L\leqslant 2$ 时，局部光照正常；当 $L\geqslant 2$ 时，局部光照过度。

当前帧 XY-LBSP 邻域布局如图 2 所示。YT-LBSP 邻域布局时，$g_{10},g_2,g_6,g_{14}$ 取值于当前帧，左右 4 列分别取值于前后 4 帧邻域；XT-LBSP 邻域布局时，$g_{16},g_8,g_4,g_{12}$ 取值于当前帧，上下 4 列分别取值于前后 4 帧邻域。经计算，视频序列的每帧图像都会得到一组(XY-LBSP，YT-LBSP，XT-LBSP)纹理特征。

### 1.2 SILTP 纹理特征

Shengcai L 等人在 LTP 的基础上提出了尺度不变局部三值模式 SILTP(Scale Invariant Local Ternary Pattern)，该模式通过改进算子的编码方式，增强纹理算子对图像尺度变化的适应性，能有效处理光照影响[7]。图像中像素点 $(x_c,y_c)$ 对应的 SILTP 编码如式(7)和式(8)所示：

$$SILTP^{\tau}_{N,R}(x_c,y_c)=\bigoplus_{k=0}^{N-1}s_\tau(I_c,I_k) \tag{7}$$

$$s_\tau(I_c,I_k)=\begin{cases}01, & I_k>(1+\tau)I_c\\ 10, & I_k<(1-\tau)I_c\\ 00, & \text{otherswise}\end{cases} \tag{8}$$

即对 $N$ 邻域像素 $I_k$ 与中心像素 $I_c$ 进行比较，根据式(8)得到 $N$ 次比较结果，利用⊕运算将所有结果连接成字符串作为 $(x_c,y_c)$ 处的 SILTP 特征值。SILTP 算子编码过程如图 3 所示，将比较结果按逆时针方向连接成 16 位二进制码(1010000000000101)后作为 SILTP 特征值。

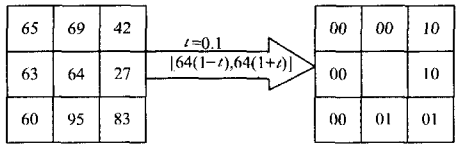


图 3 SILTP 算子编码过程

### 1.3 建立背景模型

本文改进的 ViBe 算法背景模型的初始化算法如下。

(1)对 YCbCr 颜色空间下 CbCr 分量建立背景模型

改进李加佳等人提出的背景建模方法，扩展其纹理特征范围，提高背景描述的准确度。为当前帧计算得到时空域下的一组(XY-LBSP，XT-LBSP 和 YT-LBSP)纹理特征，将背景帧与当前帧对应空间下的纹理特征进行异或运算，得到二进制表示中 1 的个数，通过式(9)得到每个正交空间中的当前帧像素作为前景的概率。

$$P_t(x,y)=(KLBSP(S_t(x,y))\oplus KLBSP(S_{t-1}(x,y)))/P \tag{9}$$

其中，$KLBSP(x)$ 表示 XY，XT 和 YT 空间中 $x$ 处的 LBSP 纹理特征，$P$ 是 LBSP 二进制表示的总位数，$S_t(x,y)$ 和 $S_{t-1}(x,y)$ 分别表示当前帧与背景帧的 LBSP 纹理特征。利用前景概率按式(10)计算得到当前帧 $I_t(x,y)$ 与前一帧背景 $B_{t-1}(x,y)$ 的估计差值 $diff$，然后按式(11)得到当前帧 CbCr 分量的背景值 $B_t(x,y)$。

$$diff=(1-P_t(x,y))(I_t(x,y)-B_{t-1}(x,y)) \tag{10}$$

$$B_t(x,y)=B_{t-1}(x,y)+diff \tag{11}$$

本文计算当前像素点的 LBSP 区域的均值 $m$ 和方差 $s^2$，将得到的 3 个特征值作为该点的背景样本值，得到背景模型 $MD1=\{(Cb_1Cr_1,m_1,s_1^2),\cdots,(Cb_nCr_n,m_n,s_n^2)\}$。

(2)对 SILTP 和 RGB 特征进行背景建模

为每个像素点的 RGB 和 SILTP 特征分别建立模型

$MD2=\{r_1g_1b_1,\cdots,r_ng_nb_n\}$ 和 $MD3=\{(siltp_1,gray_1),\cdots,(siltp_n,gray_n)\}$。由于目前基于 SILTP 背景建模的运动目标检测算法虽然保证了当前帧像素点纹理特征描述的准确性，但是在背景减除时只考虑纹理特征，而忽略了中心像素的重要性，因此本文引入 Gray 灰度特征来改进 ViBe 算法背景更新时前/背景的判断方法，以提高目标检测的准确性。

## 2　微动目标分割

本文主要是对视频中的微动目标进行提取，微动目标有以下特征：其面积至少占据图像的 1/4；除了前景目标带来的影响，背景基本不变；微动目标是人们生活中出现的自然动作，区别于汽车等的高速运动。通过对 RGB，SILTP 和 CbCr 色度分量建立背景模型，根据局部均值和方差标定的局部复杂度自适应调整检测阈值，可以得到很好的目标分割效果。

背景初始化后，计算新到来的每一帧图像的 SILTP 纹理特征和空间域下各像素 CbCr 分量的局部均值 $m$ 与方差 $s^2$。定义当前帧图像中用于背景减除的各像素点的特征集合为 $MD(x,y)=\{CbCr,SILTP,RGB,Gray\}$。通过 $MD(x,y)$ 与背景模型中相应特征样本的比较来判定前/背景点，ViBe 原理如图 4 所示。即将当前像素点 $C$ 与背景像素 $vi$ 进行比较，当两者距离小于 $R$ 的个数不小于阈值 $\#_{\min}$ 时，判断该点为背景点，并随机选取其背景模型和邻域中的一点，以 $1/\phi$ 的概率更新其为当前特征值。

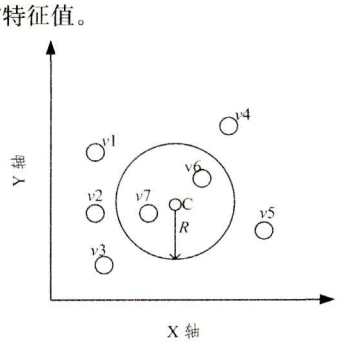


图 4　ViBe 检测原理图

本文改进的 ViBe 算法前/背景像素点的判定规则如下。

(1)对背景模型中的均值 $m$ 和方差 $s^2$ 分别求平均值 $\bar{m}$ 和 $\bar{s^2}$，如果当前帧 CbCr 特征值在 $[\bar{m}-\bar{s^2},\bar{m}+\bar{s^2}]$ 范围内，表明该像素点是背景点的概率较高，故增大阈值 $\#_{\min\text{-}cbcr}$，$\#_{\min\text{-}siltp}$ 和 $\#_{\min\text{-}rgb}$ 为 $\#_{\min}+1$，减小阈值 $R_{cbcr}$，$R_{rgb}$ 为 $R/2$，$R_{siltp}$ 为 $R_{siltp}-1$。只要当前像素点检测为背景点，就立即更新背景模型中 $m$ 和 $s^2$ 的一个样本值。一般情况下，$\#_{\min}=2$，$\phi=16$，$R=20$。

(2) 对于 CbCr 和 RGB 颜色特征来说，按照 ViBe 原理判断前/背景像素点。SILTP 特征比较时，本文将当前帧与背景模型中的 SILTP 特征值进行异或运算，得到二进制表示中 1 的个数为 $dist1$。之后采用背景模型中的 Gray 分量作为中心像素点的灰度值，在当前帧中再次计算相应位置处的 SILTP 特征值，依照上述方法求出 1 的个数 $dist2$。如果 $(dist1+dist2)/2$ 大于阈值 $R_{siltp}$，则判断该像素点在 SILTP 特征比较下为背景像素点。参考文献[3,8]，改进 $R_{siltp}$ 取值，如式(12)所示：

$$R_{siltp}=\begin{cases}3, & CbCr\in[\bar{m}-\bar{s^2},\bar{m}+\bar{s^2}]\\ 4, & CbCr\notin[\bar{m}-\bar{s^2},\bar{m}+\bar{s^2}]\end{cases}\tag{12}$$

(3)通过上述 3 种特征的比较，若都判断为背景，则该点为背景，并以 $1/\phi$ 的概率随机更新背景模型中的一组特征 $SM=\{CbCr,RGB,SILTP,m,s^2,Gray\}$ 以及 RGB 特征的 8 邻域中的一个像素点。若都判断为前景，则该点为前景，不更新背景。

若 SILTP 判断为背景，RGB 为前景，则该像素点可能为阴影。将该点的 RGB 颜色特征转化为 HSV 颜色特征，如果满足式(13)，则判断其为阴影点[7,9]，之后根据 CbCr 特征的比较结果确定前/背景点和更新方式。如果 CbCr 特征判断为背景，则该点为背景点，以 $2/\phi$ 的概率快速更新 RGB 特征，以 $1/\phi$ 的概率更新 SILTP 和 CbCr 特征；如果 CbCr 特征判断为前景，则该点为前景，因为此时两次判断结果存在冲突，故以 $2/3\phi$ 的概率更新 SILTP 特征，使背景缓慢更新。在阴影不存在的情况下，上述更新均采用正常概率 $1/\phi$。

$$\begin{cases}\theta_1\leqslant(I^v_{(x,y)}/B^v_{(x,y)})\leqslant\theta_2\\ I^s_{(x,y)}/B^s_{(x,y)}\leqslant\beta_1\\ I^H_{(x,y)}/B^H_{(x,y)}\leqslant\beta_2\end{cases}\tag{13}$$

在其他可能出现的比较结果中，当两种特征具有相同的判定结果时，该结果即为当前像素点的判定，对于背景模型中的另一种特征采用 $1/\phi$ 的概率进行更新。

## 3　微动目标的背景替换

形态学处理分割得到的二值图，得到最终的二值图像，白色和黑色像素点分别代表图像中的前景点与背景点。将当前图像中的前景区域和背景视频图像中与黑色区域对应的背景区域进行合成，便完成了背景替换。

## 4　实验结果与分析

本文所提算法的运行环境为：Windows 7 SP1 系统下 Microsoft Visual 2010 开发平台，配合 OpenCV2.4.3。硬件环境为：CPU 频率 1.70GHz，内存 4.0GB。

实验中背景通过视频前 10 帧进行建立，同时对目标微动情况下的算法检测效果进行定性分析，测试视频选用自然状态下采集的视频以及 CDW 和 CVRR 数据集中的标准视频 office 和 intelligentroom-raw，并将本文算法同 ViBe、CodeBook 以及李加佳、Xu H 提出算法做实验对比，对比结果如图 5 所示。

图 5　前景分割实验结果

因为目标会有一定时间的静止且运动幅度小，本文算法利用该特点能及时准确地更新背景特征，避免目标微动带来的外界影响，提高目标分割效率[10]。

从图 5 的实验结果可以看出，当目标发生微动时会出现以下现象：1)目标周围光照强度改变；2)光照变化造成颜色特征值浮动，以致前/背景颜色相似；3)光的遮挡与反射造成阴

影。本文算法通过多特征比较、局部复杂度限定以及阈值动态更新，有效地消除了光照影响，提高了目标分割的准确性，实现了高效的背景替换，如图 6 所示。

图 6 背景替换效果图

为了客观验证本文算法，针对检测结果，定义 $TP$ 为真实前景点数目，$TN$ 为真实背景点数目，$FN$ 为前景点误检为背景点的数目，$FP$ 为背景点误检为前景点的数目。采用 4 个参数指标[11-12]对本文提出的算法进行比较分析，分别为检测精度(Precision)、召回率(Recall)、误检率(PBC)和 F 测度(F-measure)。

$$Precision=TP/(TP+FP) \tag{14}$$

$$Recall=TP/(TP+FN) \tag{15}$$

$$PBC=100(FN+FP)/(TP+FN+FP+TN) \tag{16}$$

$$F\text{-}measure=2P*R/(P+R) \tag{17}$$

依据上述 4 个参数指标得到上述算法对比实验结果的折线图，如图 7 所示。

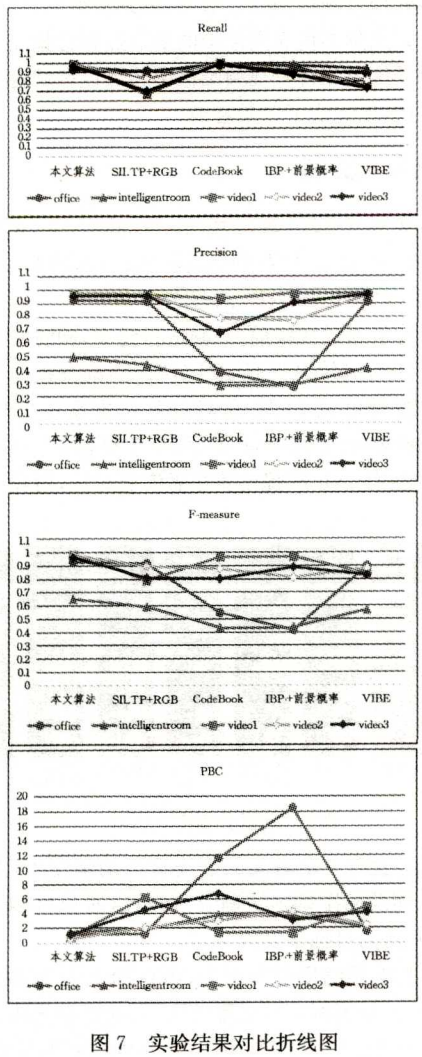


图 7 实验结果对比折线图

Precision，Recall 和 F-measure 越大越好，PBC 越小越好。通过折线图可以直观地看出，本文算法在整体性能上优于其他 4 种算法。

**结束语** 本文采用 ViBe 融合多特征的方法解决了微动目标检测过程中光照带来的影响以及前/背景颜色相似的问题，通过实验证明本文提出的算法提高了微动目标检测的准确性与分割的完整性，并最终实现了较好的背景替换。针对快速运动及较小的目标，本文算法在背景特征的更新速度与准确性上达不到微动目标的分割效果，下一步的研究将会考虑更加复杂背景下的目标检测，同时减小算法复杂度，提高运行速率，进一步完善算法。

## 参 考 文 献

[1] BARNICH O, VAN DROOGENBROECK M. ViBe: A universal background subtraction algorithm for video sequences[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2011, 20(6): 1709-1724.

[2] LI J J, PENG Q M. Motion Object Detection Algorithm for Sudden Illumination Changes[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2012, 24(11): 1405-1409. (in Chinese)
李加佳，彭启民. 适应光照突变的运动目标检测算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报，2012，24(11)：1405-1409.

[3] XU H, YU F. Improved Compressive Tracking in Surveillance Scenes[C]// 2013 Seventh International Conference on Image and Graphics (ICIG). IEEE, 2013: 869-873.

[4] LIZARRAGA-MORALES R A, GUO Y, ZHAO G, et al. Local spatio temporal features for dynamic texture synthesis[J]. Eurasip Journal on Image & Video Processing, 2014, 2014(17): 562-564.

[5] BILODEAU G A, JODON J P, SAUNIER N. Change Detection in Feature Space Using Local Binary Similarity Patterns[C]// 2013 International Conference on Computer and Robot Vision (CRV). IEEE, 2013: 106-112.

[6] STCHARLES P L, BILODEAU G A. Improving background subtraction using Local Binary Similarity Patterns[C]// 2014 IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV). IEEE Computer Society, 2014: 509-515.

[7] LIU P, ZHU Y. An Adaptive Cast Shadow Detection with Combined Texture and Color Models[J]. International Journal of Future Computer and Communication, 2014, 3(2): 113-118.

[8] YANG G L, ZHOU D, ZHANG J H. Moving Object Detection Algorithm Using SILTP Texture Information[J]. Computer Science, 2014, 41(4): 302-305. (in Chinese)
杨国亮，周丹，张进辉. 基于 SILTP 纹理信息的运动目标检测算法[J]. 计算机科学，2014，41(4)：302-305.

[9] HUANG W, KIM K, YANG Y, et al. Automatic shadow removal by illuminance in hsv color space[J]. Computer Science Information Technology, 2015, 3(3): 70-75.

[10] QU Z, MA Q W, ZHANG Q Q. Research on the Algorithm of Micro-movement Target Tracking and Extraction in Video by Multi-thread Technology[J]. Computer Science, 2012, 39(4): 265-268. (in Chinese)
瞿中，马庆伟，张庆庆. 多线程下的视频微动目标检测与提取算法研究[J]. 计算机科学，2012，39(4)：265-268.

(下转第 316 页)

小 $l_1$ 范数的求解算法，提高稀疏系数的求解精度，从而提高行为的识别准确率。

表 2 压缩比为 1 时高斯随机投影压缩感知方法的识别结果

| 待测数据 | | 识别结果 | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 行为类别 | 样本数目 | 静止数目 | 走路数目 | 跑步数目 | 上楼数目 | 下楼数目 |
| 静止 | 87 | 81 | 0 | 0 | 3 | 3 |
| 走路 | 87 | 0 | 66 | 6 | 6 | 9 |
| 跑步 | 84 | 0 | 6 | 72 | 0 | 6 |
| 上楼 | 87 | 0 | 3 | 3 | 66 | 15 |
| 下楼 | 87 | 0 | 3 | 6 | 6 | 72 |

**结束语** 通过智能手机内置加速度传感器识别静止、走路、跑步、上下楼梯等人体日常行为具有便捷、实时、不干扰用户的优点，有着广泛的应用前景。为了提高识别的准确率，本文提出一种基于压缩感知的行为识别方法。该方法首先从训练数据构造出一个冗余字典矩阵，然后基于该字典求解最小 $l_1$ 范数得到待识别样本的稀疏系数，最后计算待测样本与每一类行为所对应的所有训练样本向量的残差值，选取最小残差值所对应的行为类别作为待测样本的类别。实验结果表明，使用该方法进行移动用户行为识别的准确率可达 82.64%，高于传统的决策树和 BP 神经网络算法的识别率；同时，该方法能够对随机投影压缩后的压缩数据直接进行识别，并且在较大压缩率下仍然能够得到较好的识别效果，是一种有效的行为识别方法。

## 参 考 文 献


[1] SHOAIB M, BOSCH S, INCEL O D, et al. A Survey of Online Activity Recognition Using Mobile Phones[J]. Sensors, 2015, 15(1): 2059-2085.

[2] HOSEINI-TABATABAEI S A, GLUHAK A, TAFAZOLLI R. A survey on smart phone-based systems for opportunistic user context recognition[J]. ACM Computing Surveys (CSUR), 2013, 45(3): 1-51.

[3] SHOAIB M, BOSCH S, DURMAZLNCEL O, et al. Fusion of Smartphone Motion Sensors for Physical Activity Recognition [J]. Sensors, 2014, 14(6): 10146-10176.

[4] HOU C J, CHEN L, LV M Q, et al. Acceleration-based Activity Recognition Independent of Device Orientation and Placement [J]. Computer Science, 2014, 41(10): 76-79. (in Chinese)
侯仓健，陈岭，吕明琪，等. 基于加速度传感器的放置方式和位置无关运动识别[J]. 计算机科学，2014，41(10)：76-79.

[5] ZHANG M, SAWCHUK A A. A Feature Selection-based Framework for Human Activity Recognition Using Wearable Multimodal Sensors[C] // International Conference on Body Area Networks. Beijing, 2011.

[6] WANG Z M, CAO D. A Feature Selection Method for Behavior Recognition Based on Ant Colony Algorithm[J]. Journal of Xi'an University of Posts and Telecommunications, 2014, 19(1): 73-77. (in Chinese)
王忠民，曹栋. 基于蚁群算法的行为识别特征优选方法[J]. 西安邮电大学学报，2014，19(1)：73-77.

[7] ZHANG M, SAWCHUK A A. Human Daily Activity Recognition With Sparse Representation Using Wearable Sensors[J]. IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics, 2013, 17(3): 553-560.

[8] WU W Y, ZAHGN M, SAWCHUK A A, et al. Co-Recognition of Human Activity and Sensor Location via Compressed Sensing in Wearable Body Sensor Networks[C] // Ninth International Conference on Wearable and Implantable Body Sensor Networks. London, 2012.

[9] XIAO L, LI R F, LUO J. Recognition of Human Activity Based on Compressed Sensing in Body Sensor Networks[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2013, 35(1): 119-125. (in Chinese)
肖玲，李仁发，罗娟. 体域网中一种基于压缩感知的人体行为识别方法[J]. 电子与信息学报，2013，35(1)：119-125.

[10] SONG H, WANG Z M. Activity Recognition with Mobile Phone Accelerometers by Using Sparse Matrix Dictionary Method[J]. Application Research of Computers, 2015, 32(9): 2590-2592. (in Chinese)
宋辉，王忠民. 基于稀疏矩阵字典的移动用户行为识别方法[J]. 计算机应用研究，2015，32(9)：2590-2592.

[11] DONOBO D. Compressed Sensing[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(4): 1289-1306.

[12] BARANIUK R, CANDES E, ELAD M, et al. Applications of Sparse Representation and Compressive Sensing [Scanning the Issue][J]. Proceedings of The IEEE, 2010, 98(6): 906-909.

[13] CANDÃS E, TAO T. Decoding by linear programming[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2005, 51(12): 4203-4215.

[14] CANDES E, ROMBERG J, TAO T. Robust Uncertainty Principles: Exact Signal Reconstruction from Highly Incomplete Frequency Information [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(2): 489-509.

[15] AKIMURA D, KAWAHARA Y, ASAMI T. Compressed Sensing Method for Human Activity Sensing using Mobile Phone Accelerometers[C] // Ninth International Conference on Networked Sensing Systems. Belgium, 2012.

[16] CANDES E, CALTECH J R. l1-Magic: Recovery of Sparse Signals via Convex Programming[EB/OL]. (2005-10-1) [2009-01-29]. http://statweb.stanford.edu/~candes/l1magic/downloads/l1magic.pdf.


(上接第 312 页)


[11] VANOGENBROECK M, PQUOT O. Background subtraction: Experiments and improvements for ViBe[C] // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW). Washington D C: IEEE Computer Society Press, 2012: 32-37.

[12] KIM J, RAMIREZ RIVERA A, RYU B, et al. Simultaneous Foreground Detection and Classification With Hybrid Features [C] // Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision. 2015: 3307-3315.