

# 基于视频监控的人脸识别方法

王海龙<sup>1,2</sup>, 王怀斌<sup>1</sup>, 王荣耀<sup>1</sup>, 王海涛<sup>1</sup>, 刘 强<sup>1</sup>, 张鲁洋<sup>1</sup>, 蒋梦浩<sup>3</sup>

(1. 南京航空航天大学 自动化学院, 南京 210016;

2. 山东长城计算机系统有限公司, 山东 烟台 264003;

3. 武警江西省总队, 南昌 330025)

**摘要:** 目前人脸识别方法主要针对静态图像进行识别, 而在监控视频中, 不同视频帧人脸具有相关性且只有部分人脸能够有效反映人脸信息; 根据监控视频中人脸图像变化特性, 提出了一种基于监控视频的人脸识别方法; 首先通过结合人脸检测与跟踪技术获得视频人脸序列, 然后以视频人脸序列中部分人脸图像识别结果为导向, 选取全部人脸序列图像中的代表人脸图像进行识别, 最后根据选取的全部人脸图像识别结果综合反映人脸信息; 实验结果表明, 该方法能够在确保识别率和误识率的前提下有效提升监控视频中人脸识别的实时性。

**关键词:** 人脸识别; 监控视频; 人脸序列; 协同识别

## Face Recognition Method Based on Video Surveillance

Wang Hailong<sup>1,2</sup>, Wang Huaibin<sup>1</sup>, Wang Rongyao<sup>1</sup>, Wang Haitao<sup>1</sup>, Liu Qiang<sup>1</sup>,

Zhang Luyang<sup>1</sup>, Jiang Menghao<sup>3</sup>

(1. College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Shandong Great Wall Computer System Co., Ltd., Yantai 264003, China;

3. Jiangxi Provincial Armed Police, Nanchang 330025, China)

**Abstract:** At present, face recognition methods mainly target at static images. In video surveillance, faces of different video frames are correlated and only part of the faces can effectively reflect face information. A face recognition method based on surveillance video is proposed according to the changing characteristics of face images in surveillance video. Firstly, video face sequence is obtained by combining face detection and tracking technology, and then face images representing all face sequence images are selected for recognition based on partial face image recognition results of video face sequence. Finally, face information is comprehensively reflected according to all face image recognition results selected. Experimental results show that this method can effectively improve the real-time performance of face recognition in video surveillance while ensuring the recognition rate and error rate.

**Keywords:** face recognition; video surveillance; face sequence; synergy identification

## 0 引言

随着视频监控在生产生活、安防等方面的广泛应用和快速发展, 如何快速、准确地识别视频中大量人脸的身份信息对安防领域的发展具有重要意义。目前主流人脸识别方法准确率高, 但是模型复杂, 识别速度慢, 且在人脸库较大时, 人脸比对耗时较大。在实际视频监控中, 视频人脸识别的实时性尤为重要。因此, 提高基于监控视频的人脸识别实时性具有一定研究价值。

人脸识别发展至今, 其研究方向主要针对静态人脸图像进行识别<sup>[1-4]</sup>。相比静态人脸图像识别, 视频人脸识别有很多挑战, 包括图像质量差、对实时性要求高等。但视频数据同时具有空间信息和时间信息, 在时间和空间的联合

空间内描述人脸对人脸识别具有一定提升空间。基于视频的人脸识别方法主要分为基于视频序列的方法<sup>[5-6]</sup>、基于图像集合的方法<sup>[7-8]</sup>、基于关键帧的方法<sup>[9-10]</sup>。其中, Y. Yan 通过训练模型将视频序列人脸组合在一起以表达人脸动态变化<sup>[6]</sup>; 刘宇琦等人提出将视频人脸识别视为图像集相似度度量问题, 通过提取多帧纹理特征加以融合, 再利用带有 QPSO 优化的黎曼流形大幅度简约维度以获得视频人脸的内在表示<sup>[8]</sup>; I. S. Topkaya 等人提出通过在视频序列中提取代表性帧来实现视频中的人脸识别, 代表性帧包括正面人脸图像, 通过面部姿态和特征确定<sup>[10]</sup>。虽然上述算法具有较好的识别率, 但在实际使用时实时性表现较差, 因此本文提出了一种基于静态人脸图像识别算法的视频人脸识别方法, 在确保识别率的前提下提升视频人脸识别的实时性。

对监控视频进行人脸识别时, 如果直接应用静态人脸图像识别算法对视频进行逐帧识别, 在使用高准确率人脸识别算法和较大人脸数据库的情况下, 视频人脸识别的实时性受到挑战, 且由于逐帧识别, 视频中同一人脸产生过

收稿日期: 2020-02-06; 修回日期: 2020-03-05。

作者简介: 王海龙(1994-), 男, 安徽太和县人, 硕士研究生, 主要从事随机振动方向的研究。

通讯作者: 王海涛(1968-), 男, 江苏溧阳人, 教授, 博士生导师, 主要从事电磁、超声、激光超声检测技术、无损检测技术方向的研究。

多余识别, 导致计算资源的浪费和过高的误报。因此, 通过筛选出视频人脸序列中的相对质量较高的正面无干扰人脸图像作为代表人脸进行静态人脸图像识别能够有效地降低误报和避免过多冗余计算。

因此, 本文以静态图像人脸识别算法为基础进行视频人脸识别。通过结合监控视频中人脸序列间的时间相关性, 根据部分静态人脸图像的识别结果由粗到精的逐步确定视频人脸序列中具有识别价值的目标区域, 对目标区域内全部人脸图像进行静态人脸图像识别, 根据区域内人脸图像识别结果及确定目标区域过程中的部分人脸图像识别结果, 综合投票获得目标人脸识别结果及对应置信度。在实际监控环境下的测试结果表明, 该方法能够在确保识别率的前提下有效提升实时性, 并对识别率和误报率有较好的平衡。

## 1 视频人脸识别整体框架

基于监控视频的人脸识别方法的整体识别结构主要由两部分组成, 即视频人脸序列图像获取部分和视频人脸序列图像识别部分。如图 1 所示, 左侧部分通过结合人脸检测和跟踪获得视频流中序列人脸图像并存储于人脸序列缓冲空间, 右侧部分通过查询缓冲空间对缓冲空间中完整人脸序列进行协同识别。

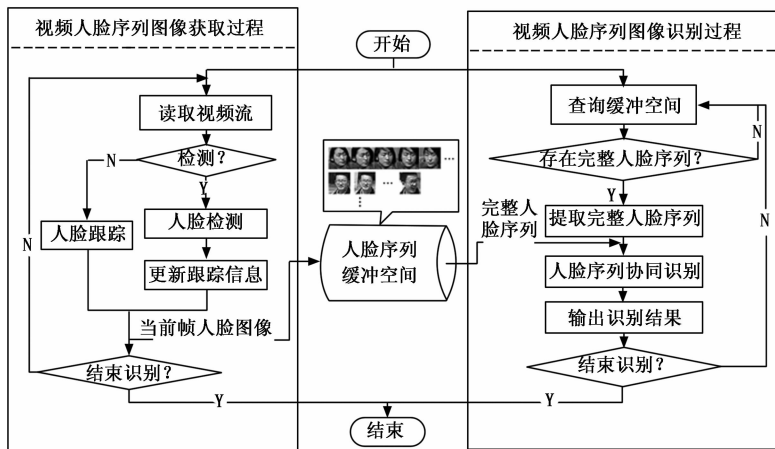


图 1 视频人脸识别整体框架图

在视频人脸序列图像获取部分, 通过人脸检测获得视频帧中人脸位置、大小信息。根据检测结果, 对后续视频帧进行跟踪, 跟踪  $N$  帧后, 再次进行检测并根据检测结果对跟踪人脸信息进行矫正和更新, 以此方式交替获得序列人脸图像。视频人脸序列图像识别部分, 通过不断查询是否有完整人脸序列图像生成, 对完整人脸序列图像利用人脸序列图像间的时间相关性进行协同识别, 以此得到对应人脸序列的识别结果。

## 2 视频人脸序列获取

### 2.1 人脸检测与跟踪算法的选择

视频人脸序列协同识别的实现对象是目标人脸在视频

中的完整人脸序列, 人脸检测与人脸跟踪的作用是为其提供有效的人脸序列。本文通过结合已有的人脸检测算法和人脸跟踪算法, 获取监控视频中目标人脸的完整人脸序列。

人脸检测算法使用了 K. P. Zhang 等人提出的 MTCNN (multi-task convolutional neural networks) 算法<sup>[11]</sup>, 该算法通过精心设计的级联 CNN 架构、在线困难样本挖掘以及人脸对齐联合学习实现了较好的人脸检测效果。人脸跟踪算法使用了 Dlib 中的 correlation tracker 单目标跟踪算法<sup>[12]</sup>, 该算法通过使用一种用在逐个检测框架中进行稳健尺度估计的方法在准确性和实时性方面有较好的平衡, 能够对一般场景中的人脸进行有效跟踪。

### 2.2 人脸序列生成

跟踪人脸检测与跟踪的目的是获得监控视频中出现的每张人脸的全部人脸序列图像。主要实现思想为, 对视频每隔  $N$  帧检测一次, 在相邻检测帧间根据检测获得的人脸信息进行跟踪, 每次检测对跟踪结果进行矫正, 直至人脸消失获得完整人脸序列图像。具体步骤如下所示:

Step 1: 初始检测获得当前帧中全部人脸位置信息, 并将人脸检测结果作为跟踪目标开始跟踪并将对应人脸序列图像存储于人脸序列缓冲空间。

Step 2: 跟踪  $N$  帧后, 对视频帧再次检测获得检测人脸信息。设检测所得人脸区域面积为  $D$ , 跟踪人脸区域面积为  $T_i$  ( $i$  表示第  $i$  个跟踪人脸), 检测人脸区域与跟踪人脸区域重合区域面积为  $D \cap T_i$ 。设  $P$  为检测人脸与所有跟踪人脸的最大重合度,  $P$  定义如下:

$$P = \max \left\{ \frac{D \cap T_i}{\min\{D, T_i\}} \right\} \quad (1)$$

若  $P$  大于设定阈值, 则认为当前检测所得人脸属于  $P$  对应跟踪人脸  $i$ 。在下一帧进行跟踪时, 使用该检测人脸信息代替跟踪人脸  $i$  位置信息进行跟踪。若  $P$  小于设定阈值, 则增加跟踪人脸。

Step 3: 对检测到的全部人脸信息使用 Step 2 中方法对已跟踪人脸进行矫正或增加跟踪人脸。

Step 4: 重复以上步骤进行检测与跟踪直至人脸在视频中消失, 对结束跟踪的人脸序列中添加结束标记。

## 3 视频人脸序列协同识别

视频人脸序列协同识别方法以针对静态图像的人脸识别算法为基础, 根据人脸序列图像的时间相关性, 通过选择具有代表性的人脸图像进行人脸识别, 以此反映全部人脸序列图像对应人脸信息。

### 3.1 人脸相似度距离表征

对静态人脸图像的识别首先需要提取人脸图像特征, 本文使用 FaceNet 网络提取人脸特征<sup>[13]</sup>。FaceNet 通过卷积神经网络学习将图像映射到欧几里得空间, 空间距离直接

和图片相似度相关。这种映射关系也可以称之为嵌入 (embedding), 即将原特征映射到一个新的特征空间, 新的特征就被看作是一种嵌入。因此, 将图像通过 FaceNet 映射所得的 512 维向量表征了图像人脸特征。

人脸特征分类是静态图像人脸识别过程的最后一步, 通过上述 FaceNet 模型得到待识别人脸图像的 512 维特征向量以及人脸库所有图像的特征向量, 根据数据分类算法即可判断待识别人脸图像所属人脸库类别。本文使用 KNN 算法 (k-nearest neighbors) 进行人脸特征数据分类<sup>[14-15]</sup>。

KNN 算法思想是: 如果一个样本在特征空间中的  $k$  个最相似 (即特征空间中最邻近) 的样本中的大多数属于某一个类别, 则该样本也属于这个类别。算法步骤为首先计算待识别人脸与所有人类库特征向量欧式距离, 计算公式为:

$$d(x, y) = \sqrt{\sum_{i=0}^n (x_i - y_i)^2} \quad (2)$$

其次选择  $k$  个在最近的人脸库特征向量作为样本, 最后统计出  $k$  个样本中大多数样本所属的类别, 这个类别就是输入人脸图像的识别结果。

静态人脸图像的识别, 由人脸图像特征提取和人脸特征分类来两部分构成, 通过 KNN 的思想用距离远近来度量人脸的相似程度, 距离越小则相似度越高。对一未知人脸图像的识别, 比较该人脸图像与人脸库中所有人脸图像间的距离, 距离最近的人脸库图像类别即为该人脸图像所属类别, 如图 2 所示。

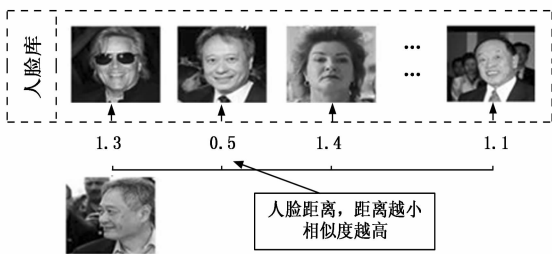


图 2 人脸相似度距离表征示意图

### 3.2 视频人脸序列协同识别

根据 3.1 节中所述利用欧式距离表征两张人脸图像的相似度, 距离越近, 相似度越高。而在监控视频中的人脸受角度、距离、光照等因素有一个连续变化的过程, 这意味着在全部人脸序列图像中只有部分人脸图像与人脸库图像距离较近, 如图 3 所示。因此, 通过挑选出距离人脸库图像距离最近的人脸序列区域进行识别, 识别结果能够有效反映人脸身份信息。

视频人脸序列协同识别方法的对象为目标人脸在视频中出现的全部人脸图像的集合, 该方法旨在通过以一定方法挑选全部人脸序列图像中的部分具有代表性的人脸图像进行人脸识别, 最终通过被选中部分人脸图像的识别结果反映目标人脸的分类信息。

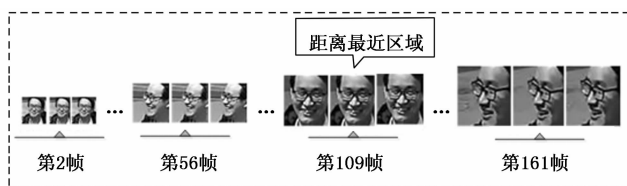


图 3 监控视频序列人脸图像

人脸序列目标区域的选择方法可概要描述为: 对全部序列人脸均匀抽取一定人脸图像进行识别, 根据识别结果, 在距离人脸库图像最近的区域进行更密集的抽取, 以此不断缩小目标序列区域范围。最后, 根据最终目标序列区域及抽取人脸图像识别结果综合得出人脸序列识别结果。算法设计如下:

假设查询人脸序列缓冲空间时, 缓冲空间由不同长度的人脸序列组成, 这里表示为集合  $X = \{X_1, X_2, \dots, X_M\}$ 。设遍历查询至  $X_2$  时,  $X_2$  存在结束标志位, 即  $X_2$  是一个完整人脸序列图像集。将人脸序列集合  $X_2$  表示为  $N_i (i = 1, 2, \dots, m)$ , 其中  $i$  表示第  $i$  帧人脸图像。

Step 1: 初始化参数设置: 序列目标区域左边界位置  $S_L = 1$ , 序列目标区域右边界位置  $S_R = m$ , 目标区域等间隔抽取间隔数为  $n$ ;

Step 2: 第一次目标区域筛选: 对序列集合  $N_i$  根据图像位置进行平均抽取, 抽取间隔内包含帧数为  $d = \frac{(S_R - S_L)}{n}$ ,

抽取帧所处位置集合  $L = \{S_L, S_L + \frac{S_R}{n}, S_L + (\frac{S_R}{n}) \times 2, \dots, S_L + (\frac{S_R}{n}) \times (n-1), S_R\}$ , 第一次选择样本集  $F = \{N_{S_L}, N_{S_L + \frac{S_R}{n}}, N_{S_L + (\frac{S_R}{n}) \times 2}, \dots, N_{S_L + (\frac{S_R}{n}) \times (n-1)}, N_{S_R}\}$ 。对样本集  $F$  中人脸图像进行人脸识别, 得到  $F$  中人脸图像识别结果, 包括分类结果及最小距离集合  $D$ , 其中  $D = \{D_{S_L}, D_{S_L + S_R/n}, D_{S_L + (S_R/n) \times 2}, \dots, D_{S_L + (S_R/n) \times (n-1)}, D_{S_R}\}$ 。求集合  $D$  中元素最小值获得抽取人脸中的最小距离  $D_{\min}$ , 设  $D_{\min}$  在序列集合  $N_i$  中对应人脸图像为  $N_k$ ;

Step 3: 第二次目标区域筛选: 根据第一次目标区域筛选, 在第  $k$  帧人脸图像附近距离最小, 具有更好识别效果。以第  $k$  帧人脸图像为中心, 取目标区域帧数范围大小为  $2 \times d$ , 更新目标筛选区域边  $S_L, S_R$  以及间隔帧数  $d$ 。更新结果如下:

$$S_L = \begin{cases} S_L, & k = S_L \\ S_L - 2 \times d, & k = S_R \\ k - d, & \text{其他} \end{cases}$$

$$S_R = \begin{cases} S_L + 2 \times d, & k = S_L \\ S_R, & k = S_R, d = \frac{(2 \times d)}{n} \\ k + d, & \text{其他} \end{cases}$$

Step 4: 根据更新后的目标序列区域信息  $S_L, S_R$  和抽取间隔  $d$ , 重复 Step 2、Step 3 步骤不断缩小序列目标区域范

围至  $S_R - S_L < n$ 。对最终目标区域人脸图像进行识别, 获得目标区域人脸图像识别结果。取目标区域及距离目标区域最近  $G_1$  个识别信息构成决策样本集  $C_1$ , 取所有识别信息 (包括抽取识别人脸、目标区域人脸) 中距离最小的  $G_2$  个人脸构成决策样本集  $C_2$ 。最终识别结果得分决策公式如下:

$$Score =$$

$$\begin{cases} \frac{C1_{max}}{G1} \times \omega_1 + \frac{C2_{max}}{G2} \times \omega_2 & C1'_{max} = C2'_{max} \\ \max\left\{\frac{C1_{max}}{G1}, \frac{C2_{max}}{G2}\right\} \times \omega_3 & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $C1_{max}, C2_{max}$  分别为决策样本集  $C_1, C_2$  的出现最多的人脸次数, 对应识别结果为  $C1'_{max}, C2'_{max}$ ;  $G_1, G_2$  分别为样本集  $C_1, C_2$  的元素个数;  $\omega_1, \omega_2, \omega_3$  为对应模块权重系数。通过设置阈值  $Threshold$  确定目标人脸是否在人脸库中。

### 4 实验与分析

为验证本文所述方法的有效性, 对 20 万人脸库中的 45 个个体在监控视频下进行了测试, 测试人员在监控视频中出现的帧数最少为 20 帧, 最多为 214 帧。实验测试系统为 Ubuntu16.04, 处理器为 I7-7800X, 内存大小为 64 G, GPU 为 GTX1080TI。

在上述硬件环境下, 本文方法中主要模块时间复杂度及相关参数设置如下: 测试视频分辨率为  $1920 \times 1080$ ; 人脸检测时间为 0.2 s; 人脸跟踪时间为 0.02 s; 静态图像人脸识别时间为 0.4 s; 检测频率为每 10 帧检测一次; 均匀抽取间隔数为 5; 阈值为 0.7。

#### 4.1 视频人脸序列协同识别过程及结果

对一个长度为 148 帧的完整人脸序列的识别过程及对应人脸图像识别结果如图 4 所示。图 4 左图为目标区域选择过程的可视化, 图中浅灰色五角星表示全部人脸序列图像与人脸库图像的最近距离, 其他不同形式的标记根据标签所示代表不同次数选择的人脸图像最近距离。右图为对左图中选择人脸识别正确与否的图示, 其中浅灰色五角星代表意义与左图一致, 方形表示对应选择人脸识别错误, 圆点表示识别正确。为直观显示选取识别情况, 对全部序列人脸图像识别结果进行了校验, 浅灰色五角星中心有叉号的表示该帧人脸识别正确, 无叉号的表示识别错误。

由图 4 左图可知, 在 100~120 帧区间内的人脸序列图像与人脸库图像具有最小距离, 根据本文方法经过 4 次目标区域范围缩小, 最终确定目标区域范围在第 5 次选择区域附近。由右图可知, 第 5 次选择区域附近 (目标区域) 人脸具有正确的识别结果, 因此, 本文所述方法能够有效地

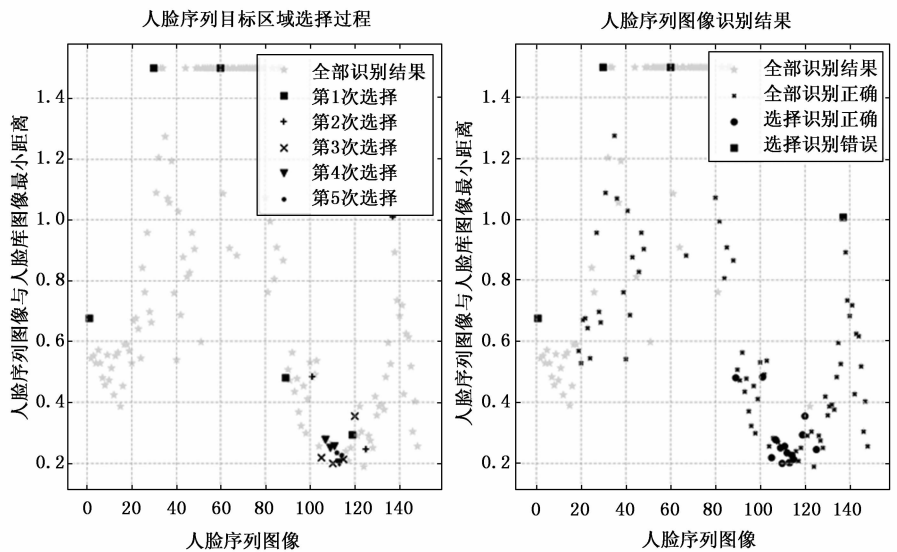


图 4 人脸序列协同识别过程及识别结果图

对监控视频下人脸序列图像进行识别。

#### 4.2 识别率及误报率分析

视频人脸识别中, 识别率和误报率是两个重要指标。为了说明本文方法在提升实时性后视频人脸识别在识别率和误报率方面的表现, 对 45 个测试人员使用逐帧图像人脸识别和本文所述方法进行测试, 并对识别结果正确与否绘制了不同阈值下两种识别方法的识别率-误识率散点图, 如图 5 所示, 图中关键位置数据见表 1。

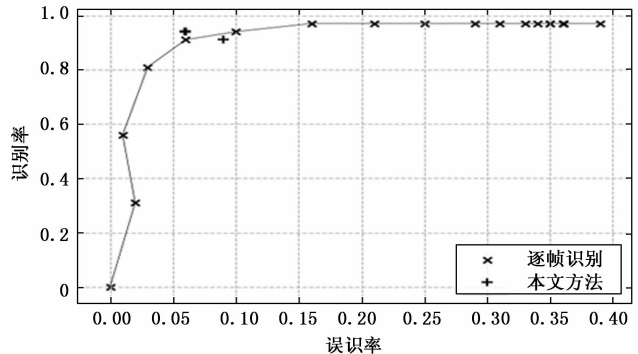


图 5 两种方法在不同阈值下性能比较

由图 5 可知, 逐帧图像人脸识别在不同阈值下具有不同的正确识别率和误识率, 且在具有高识别率的阈值下误报率相对较大, 识别率和误报率随阈值变化呈同步增长关系。而本文所述方法由于识别人脸图像为部分具有最优识别结果的人脸序列图像且识别对象为整个人脸序列, 因此识别率和误报率对阈值设置并不敏感。由散点图可知, 对识别率和误报率的平衡中, 绘制点越靠近左上角 (0, 1) 处则效果最优, 即识别率尽可能高的情况下误报率尽量低。由图 5 可知, 本文方法在大多数不同阈值下的识别率和错误率是恒定的, 而重合点相对逐帧图像人脸识别更靠近 (0, 1) 处。因此, 虽然本文方法在识别率方面略低于逐帧

识别的最高准确率,但在误报率和识别率的平衡中具有较好的表现。

表1 图5中靠近(0,1)处部分阈值下识别率和误识率

逐帧识别	识别率	0.32	0.58	0.81	0.9	0.94	0.97
	误报率	0.02	0.01	0.03	0.06	0.1	0.16
本文方法	识别率	0.94	0.94	0.94	0.94	0.9	0.94
	误报率	0.06	0.06	0.06	0.06	0.09	0.06

### 4.3 实时性分析

评价本文方法实时性的主要依据是能否通过人脸检测与跟踪实时生成人脸序列并同时生成序列实时识别。为评价人脸序列识别速度能否匹配其生成速度,对不同长度的人脸序列生成时间和识别时间进行了统计,如图6所示。统计结果显示,在当前环境及参数条件下,当人脸序列长度大于216时,人脸序列识别时间小于生成时间。即在人脸序列大于216时,视频人脸识别的实时性不受人脸序列识别速度的影响,仅取决于人脸检测和跟踪的时间复杂度。在帧率为24的视频人脸识别中表现为,如果人脸在视频中出现时间大于9s,则实时性仅由检测和跟踪模块决定。人脸检测和跟踪模块时间复杂度由图6三角散点分布情况可知,根据统计结果,序列生成速率约为23.33帧每秒,因此视频人脸识别能够进行实时识别。

相比直接将图像人脸识别算法以逐帧识别的方式应用于视频,本文方法利用监控视频中人脸序列的时间相关性避免了过多的冗余计算。为直观体现不同序列长度下实时性的提升,统计了逐帧识别与本文所述方法在不同长度人脸序列下的识别时间,如图6圆形和方形分布。由图中统计结果可知,不同序列长度下,本文方法识别时间均小于逐帧识别。且由于逐帧识别的识别时间随序列长度线性递增,而本文所述方法的识别时间随序列长度增加而增速减缓,因此,随人脸序列长度增加,本文所述方法时间成本相对更低。

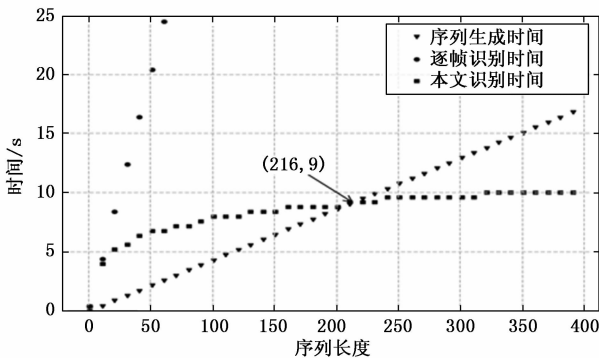


图6 不同序列长度下人脸序列生成时间与识别时间比较

## 5 结束语

本文讨论了基于监控视频的人脸识别方法,以针对图像的人脸识别方法为基础,结合人脸图像在视频中的时间相关性,通过选取全部人脸序列图像中的部分图像进行识

别分析,以此获取人脸身份信息。文中提出的以部分人脸图像识别结果为导向,以选取部分具有最优识别结果的序列区域作为代表人脸图像进行识别的方法,为基于图像的人脸识别方法在视频中应用提供了新的思路。通过实验验证,本文所述方法在确保识别率的前提下有效地提升了视频人脸识别的实时性,并在一定程度上改善了视频人脸识别中的误差。

### 参考文献:

- [1] 左腾. 人脸识别技术综述 [J]. 软件导刊, 2017, 16 (2): 182-185.
- [2] Turk M, Pentlan A. Eigenfaces for recognition [J]. Journal of cognitive neuroscience, 1991, 3 (1): 71-68.
- [3] Zhou X D, Chen X H, Qian Q. Spatial regularization of canonical correlation analysis for low-resolution face recognition [J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2013, 30 (1): 77-81.
- [4] Wang M, Deng W. Deep face recognition: a survey [J]. arXiv preprint arXiv: 1804.06655, 2018.
- [5] Geng X, Smith-Miles K, Wang L, et al. Context-aware fusion: a case study on fusion of gait and face for human identification in video [J]. Pattern Recognition, 2010, 43 (10): 3660-3673.
- [6] Yan Y, Zhang Y J. State-of-the-Art on video-based face recognition [J]. Chinese Journal of Computers, 2009, 32 (5): 878-886.
- [7] 于谦, 高阳, 霍静, 等. 视频人脸识别中判别性联合多流形分析 [J]. 软件学报, 2015, 26 (11): 2897-2911.
- [8] 刘宇琦. 视频人脸及人体行为识别关键技术研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2018.
- [9] 孟繁静, 王连明. 视频人脸识别系统中的最佳人脸捕获 [J]. 东北师大学报 (自然科学版), 2015, 47 (3): 90-95.
- [10] Topkaya I S, Bayazit N G. Improving face recognition from videos with preprocessed representative faces [A]. ISICIS/08. 23rd International Symposium on Computer and Information Sciences [C]. 2008.
- [11] Zhang K P, Zhang Z, Li Z, et al. Joint face detection and alignment using multitask cascaded convolutional networks [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2016, 23 (10): 1499-1503.
- [12] Danelljan M, Häger G, Khan F S, et al. Discriminative scale space tracking [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2016, 39 (8): 1561-1575.
- [13] Schroff F, Kalenichenko D, Philbin J. Facenet: a unified embedding for face recognition and clustering [A]. CVPR [C]. 2015: 815-823.
- [14] Denooux T. A k-nearest neighbor classification rule based on Dempster-Shafer theory [J]. Systems Man & Cybernetics IEEE Transactions on, 1995, 25 (5): 804-813.
- [15] Leng X F, Gong Z, Fu R Z, Liu Y. A sequence image matching method based on improved high-dimensional combined features [J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018, 35 (5): 820-828.