

文章编号 1004-924X(2011)11-2744-09

## 应用梯度矢量流 Snake 和灰预测的人脸轮廓跟踪

周志宇<sup>1\*</sup>, 杨卫成<sup>1</sup>, 汪亚明<sup>1</sup>, 张建新<sup>2</sup>, 郑磊<sup>1</sup>

(1. 浙江理工大学 信息电子学院, 浙江 杭州 310018;

2. 浙江理工大学 机械与自动控制学院, 浙江 杭州 310018)

**摘要:** 为了提高动态图像序列中人脸轮廓跟踪时梯度矢量流(GVF)Snake 算法的实时性,同时解决人脸跟踪中的遮挡问题,提出了 GVF Snake 和单变量一阶灰色模型 GM(1,1)相结合的人脸轮廓提取方法。该方法首先利用人脸运动信息和肤色模型粗略地检测出运动人脸轮廓,然后采用 GVF Snake 算法将人脸轮廓精确地提取出来,从而有效解决 GVF Snake 算法的初始化问题。根据人脸轮廓运动的整体性,利用 GM(1,1)模型预测人脸轮廓质心的位置,并以预测位置作为 GVF Snake 的迭代依据,同时将 GVF Snake 提取的人脸轮廓质心位置作为下一帧图像 GM(1,1)模型的预测依据。存在遮挡时,则以 GM(1,1)模型预测保持跟踪的连续性。实验结果表明,该算法跟踪的平均时间仅为 GVF Snake 算法的 8.0%,平均跟踪误差仅为 GVF Snake 算法的 31.2%,而且能更好地反映人脸轮廓的运动规律,跟踪实时性强,鲁棒性好。

**关键词:** 肤色模型;梯度矢量流 Snake;一阶灰度模型 GM(1,1);人脸轮廓跟踪

**中图分类号:** TP391.4-4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111911.2744

## Realization of face contour tracking by GVF Snake and grey prediction

ZHOU Zhi-yu<sup>1\*</sup>, YANG Wei-cheng<sup>1</sup>, WANG Ya-ming<sup>1</sup>, ZHANG Jian-xin<sup>2</sup>, ZHENG Lei<sup>1</sup>

(1. College of Information and Electronics, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China; 2. College of Mechanical Engineering and Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

\* Corresponding author, E-mail: zhouzhiyu1993@163.com

**Abstract:** In order to improve the real-time performance of the Gradient Vector Flow Snake (GVF Snake) algorithm for face contour tracking in a dynamic image sequence and to overcome the occlusion problem in face tracking, a novel image extraction method combining the GVF Snake algorithm and the single variable first-order grey model GM(1,1) is proposed to extract the face contour. In this method, the moving face contour is roughly detected out firstly by using human motion information and the skin-color model, and then the accurate face contour is extracted by using the GVF Snake algorithm, by which the initialization problem of the GVF Snake algorithm is solved. For the integrity feature of face contour motion, the GM(1,1) model is used to predict the centroid position of face con-

收稿日期:2011-05-09;修订日期:2011-06-21.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60873020, No. 61070063);浙江省自然科学基金资助项目(No. Y1090256, No. Z1080702)

tour and then the position is used as the iteration basis of the GVF Snake algorithm. Meanwhile, the centroid position of face contour extracted with GVF Snake is taken as the prediction basis of the GM(1,1) model for the next frame. When the occlusion exists, the continuity of tracking can be held with the prediction of GM(1,1) model. Experimental results show that by proposed method, the average tracking time and the average tracking error are only 8.0% and 31.2% of those of the GVF Snake algorithm respectively. It can be concluded that this method can better reflect the motion law of face contour, and has strong real-time performance and good robustness.

**Key words:** skin-color model; Gradient Vector Flow Snake(GVF Snake); First-order Gray Model(GM(1,1)) model; face contour tracking

## 1 引 言

人脸跟踪<sup>[1-2]</sup>在视频会议、安全访问控制、视觉监测、基于内容的压缩与检索和新一代人机界面智能识别等领域均有较大的应用前景,是计算机视觉领域的研究热点。基于肤色模型的人脸跟踪<sup>[3-4]</sup>和基于轮廓模型的人脸跟踪<sup>[5-7]</sup>是最常用的方法。单一的肤色模型在序列图像中容易产生人脸“过检测”的问题;单一的形变轮廓模型往往需要人脸轮廓的初始化,而且无法解决遮挡情况下的人脸跟踪问题。文献[5]提出了将改进的水平集(level set)结合粒子滤波的轮廓跟踪算法,该方法通过增加粒子数目来提高跟踪精度时会影响跟踪的实时性。文献[6]提出了用肤色信息和 level set 进行人脸轮廓提取,这种方法抗噪性能好,对姿态变化不敏感,但实时性较差。文献[7]采用改进的 level set 和一阶线性卡尔曼(Kalman)滤波器在简单背景下较好地跟踪出运动人脸轮廓,但未对遮挡问题和姿态变化等问题给出解决方案。

传统的主动轮廓模型(Snake 算法<sup>[8]</sup>)能够保证得到封闭的轮廓,且对图像噪声不敏感,但该模型不能检测到物体内部具有较高曲率的“U”形轮廓,不能同时检测一帧图像中的多个目标,轮廓的初始化困难。为了解决这些问题,文献[9]提出了梯度矢量流算法,这种方法降低了对活动轮廓初始位置的敏感性,可分割凹陷的边界,且抗噪性能更强,但其未加入预测模型来有效解决遮挡问题。文献[10]提出了一种将几何活动轮廓(Geometric Active Contour)模型与无边活动轮廓(Active Contours without Edges)模型相结合的活动轮廓模型,这种方法解决了传统的 Snake 模型重新初

始化困难的问题。文献[11]提出了轮廓线“有效逼近域”概念,有效解决了不能逼近复杂轮廓域,初始轮廓线设置复杂等问题。

卡尔曼滤波器<sup>[12-13]</sup>是目标跟踪中常用的预测模型,由于它事先假定了运动状态,当实际运动状态与所建运动模型保持一致时能够正常跟踪,但当目标运动状态变化时,残差序列不再满足白噪声的相关性质,因此卡尔曼滤波器不适合跟踪含非线性和非高斯成分的自由运动人脸。灰色预测模型<sup>[14]</sup>不是利用原始数据直接建模,而是将原始数据进行累加,并进行处理后再建立微分方程,从而弱化数据序列随机性,因此具有发掘系统演化规律的独特功效。由于人脸运动并不是一种严格的线性运动,人脸运动中可能存在固定物体遮挡和多人脸的相互遮挡,可能存在姿态变化,表情变化和光照变化,因此本文用单变量一阶灰色模型 GM(1,1) 进行人脸跟踪以更好地反映人脸的运动规律,从而增强跟踪的鲁棒性。

为了解决 GVF Snake 对初始位置较敏感的问题,同时避免初始轮廓线设置的复杂性,本文采用运动差分和肤色模型相结合的方法在复杂背景中获取人脸的初始位置,而且由于运动差分得到的运动区域大大减少了肤色模型的搜索范围,可以有效抑制肤色模型产生人脸“过检测”的问题。为了增强跟踪的实时性,本文提出不存在遮挡时以单变量一阶灰色模型(Single variable first-order grey model(GM(1,1)))模型预测点作为 GVF Snake 模型的初始迭代中心来减少 GVF Snake 模型的迭代次数;当人脸存在遮挡时,以 GM(1,1)模型预测点代替人脸真实位置值保持跟踪的连续性,从而解决了遮挡情况下 GVF Snake 无法有效跟踪人脸的问题。因此,本文在结合运动信息

和肤色模型确定人脸初始位置的基础上,提出了基于 GVF Snake 模型和 GM(1,1)模型的方法来解决存在人脸遮挡,人体姿态变化,人脸表情变化和外界光照变化人脸轮廓跟踪。

## 2 Snake 算法和 GVF Snake 算法

### 2.1 Snake 算法

Snake 是一种弹性曲线,Snake 的参数描述为  $v(s) = \{x(s), y(s)\}$ ,  $s \in [0, 1]$  ( $s$  为归一化的曲线长度),它的总能量函数为:

$$E_{\text{snake}} = \int [E_{\text{int}}(v(s)) + E_{\text{ext}}(v(s))] ds. \quad (1)$$

通过最小化式(1)的能量函数来锁定图像特征,其中  $E_{\text{int}}$  为内部能量项,用于控制曲线的弹性和刚度,定义为:

$$E_{\text{int}} = \alpha(s) \left| \frac{dy}{ds} \right| + \beta(s) \left| \frac{d^2y}{ds^2} \right|^2, \quad (2)$$

式中  $\alpha$  和  $\beta$  分别为控制曲线弹性和刚度的参数,  $\left| \frac{dy}{ds} \right|$  和  $\left| \frac{d^2y}{ds^2} \right|$  分别为 Snake 曲线的一阶导数和二阶导数。 $E_{\text{ext}}$  为与图像有关的外部能量项,将 Snake 吸引到图像特征附近,外部特征边缘的典型外部能量项定义为:

$$E_{\text{ext}} = -|\nabla I(x, y)|^2, \quad (3)$$

其中  $\nabla I(x, y)$  为图像的梯度,传统的 Snake 模型对初始轮廓非常敏感,并且对深度凹陷的目标轮廓达不到理想的收敛结果。

### 2.2 GVF Snake 算法

GVF Snake 模型<sup>[9]</sup>通过改进外部力场来增大 Snake 的捕捉范围,这种新的外部力场称为梯度矢量流,它由二维向量场  $\mathbf{V}[x, y] = [\mathbf{u}(x, y), \mathbf{v}(x, y)]$  组成,通过最小化如下能量函数得到:

$$E = \iint u(u_x^2 + u_y^2 + v_x^2 + v_y^2) + |\nabla f|^2 |v - \nabla f|^2 dx dy, \quad (4)$$

式中,  $u$  为控制参数,  $u_x^2, u_y^2, v_x^2, v_y^2$  分别为  $u, v$  在  $x, y$  方向上的导数,  $f$  为图像函数,  $\nabla f$  为  $f$  在  $(x, y)$  处的梯度。 $|\nabla f|$  较小时,第一项偏微分决定公式的能量;当其较大时,第二项决定整个积分。

GVF Snake 外部力场的作用远大于传统 Snake 力场的作用范围,具有更大的搜索范围,对

活动轮廓初始位置的敏感性降低,可分割凹陷的边界,抗噪性能更强,而且不必预先知道轮廓线是要膨胀还是收缩,从而获得较好的分割效果。

## 3 人脸跟踪

### 3.1 人脸轮廓提取

本文跟踪的人脸轮廓是指头发区域以下、下巴以上、左右脸颊和耳朵组成的肤色区域的边缘曲线。为了准确定位人脸,本文将运动信息、肤色模型和 GVF Snake 相结合以精确提取人脸轮廓。为提取人脸的初始位置,同时提高帧间差分效果,本文利用连续 3 帧图像检测运动区域,判断像素点是否属于运动区域的公式如下:

$$D(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{if } |f_k(x, y) - f_{k-1}(x, y)| > T \\ & \text{and } |f_{k+1}(x, y) - f_k(x, y)| > T, \\ 0 & \end{cases} \quad (5)$$

式中  $T$  为差分图像二值化的阈值,由最大类间方差法(Otsu 法)确定。图像经过二值分割后,运用膨胀和腐蚀操作来消除噪声的影响。分别对单人脸和多人脸序列图像进行实验,对获得的运动区域用白框标记出来,实验结果如图 1(a), (d) 所示。然后在运动区域内结合 YCbCr 模型和 HSV 模型的肤色模型获取人体肤色区域,从而减小外界干扰。根据人脸区域的长宽比去除非人脸肤色区域,从而得到人脸的初始位置,并绘制出人脸的初始轮廓曲线,实验结果如图 1(b), (e)。然后用 GVF Snake 模型迭代提取人脸轮廓线,实验结果如图 1(c), (f) 所示,其局部显示图像如图 1(g), (h) 所示,描述人脸轮廓线的点数需要根据人脸区域的大小来确定,图 1(g) 和 (h) 的轮廓曲线点数分别为 248, 134, 131。运用帧间差分得到差分图像,以 Otsu 法自动确定阈值避免了人工确定阈值的方法容易受周围环境变化的影响导致必须重新调整阈值来获得最佳分割的问题。本文使用的原始图像大小为  $576 \times 720$ ,检测到的运动区域大小为  $514 \times 134$ ,考虑到人脸总是位于身体的上方,实验中对运动区域从上到下寻找人脸肤色,搜索面积为  $257 \times 134$ ,仅为全局搜索面积的 8.3%。在运动区域内结合人脸总是位于身体的上方的假设获得人脸区域,这样避免了人脸的全局搜索,从而解决 GVF Snake 初始化问题。



(a) 单目标运动区域 (b) 单人脸的初始轮廓曲线 (c) 单人脸的轮廓曲线

(a) Moving region of single object (b) Initial contour of single face (c) Face contour of single face



(d) 多目标运动区域 (e) 多人脸的初始轮廓曲线 (f) 多人脸的轮廓曲线

(d) Moving region of multi-objects (e) Initial contour of multi-faces (f) Face contour of multi-faces



(g) (c) 的轮廓图像局部显示  
(g) Locally display for contour image of (c)



(h) (f) 的轮廓图像局部显示  
(h) Locally display for contour image of (f)

图 1 人脸轮廓提取结果

Fig. 1 Results of face contour extracting

### 3.2 GM(1,1)模型

灰色系统理论是由邓聚龙教授首先提出并创立的一门新兴学科,灰色模型 GM(1,1)<sup>[14]</sup>定义如下:

设非负序列  $X^{(0)} = \{x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots,$

$x^{(0)}(n)\}$ , 令  $x^{(1)}(t) = \sum_{i=1}^t x^{(0)}(i), t=1, 2, \dots, n$ , 可得到一阶累加序列:  $X^{(1)} = (x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), \dots, x^{(1)}(n))$ 。

令  $Z^{(1)}(k) = \frac{1}{2}[x^{(1)}(k) + x^{(1)}(k-1)], t=2, 3, \dots, n$ , 得到紧邻均值生成序列:

$$Z^{(1)} = (z^{(1)}(1), z^{(1)}(2), \dots, z^{(1)}(n)), \text{ 则称: } x^{(0)}(k) + a z^{(1)}(k) = \mu, \quad (6)$$

为 GM(1,1)模型,该模型白化形式的微分方程为

$$\frac{dx^{(1)}(t)}{dt} + ax^{(1)}(t) = \mu, \quad (7)$$

式中  $a, \mu$  为建模过程中的待定参数,则灰色预测模型为:

$$\hat{x}^{(0)}(t+1) = (1 - e^{-a}) \left[ x^{(0)}(1) - \frac{\mu}{a} \right] e^{-at}, \quad t=1, 2, \dots, n \quad (8)$$

### 3.3 基于 GM(1,1)模型的人脸轮廓跟踪

用 GVF Snake 方法获得前 4 帧图像的人脸轮廓质心作为二个 GM(1,1)模型的原始序列  $X^{(0)} = (x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(4))$ , 便可用两个 GM(1,1)模型分别从  $x, y$  方向预测第 5 帧图像的人脸轮廓质心位置,此时

$$Y = \begin{bmatrix} x^{(0)}(2) \\ x^{(0)}(3) \\ x^{(0)}(4) \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} -z^{(1)}(2)1 \\ -z^{(1)}(3)1 \\ -z^{(1)}(4)1 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

则建模过程中的待定参数  $a, \mu$  计算如

$$\begin{bmatrix} a \\ \mu \end{bmatrix} = (B^T B)^{-1} B^T Y. \quad (10)$$

因此第 5 帧图像的人脸轮廓质心位置预测值为

$$\hat{x}^{(0)}(5) = (1 - e^{-a}) \left[ x^{(0)}(1) - \frac{\mu}{a} \right] e^{-5a}. \quad (11)$$

并将人脸轮廓质心的预测值作为下一帧图像的 GVF Snake 迭代依据。为避免新的随机扰动或噪声进入系统,将 GVF Snake 迭代后得到第 5 帧图像人脸轮廓的质心位置加入序列,去除序列中的第 1 帧图像的人脸轮廓质心位置,从而对 GM(1,1)模型进行“新陈代谢”,这样用 GM(1,1)模型预测的结果更能真实地反映人脸轮廓运动规律。

## 4 实验结果分析

为了测试本文算法在动态场景下对人脸轮廓跟踪的性能,对多个用索尼数码摄像机自己拍摄的视频序列进行了人脸轮廓跟踪测试。

### 4.1 一般情况的人脸轮廓跟踪

本文对室内拍摄的单人人脸轮廓序列进行跟踪,首先利用帧间差分得到人运动区域,结合人脸在人体上部的实际情况,用肤色模型在人体的上部进行匹配,取得人脸的初始区域,作为 GVF Snake 模型的迭代依据,从而解决了 GVF Snake 模型的初始化问题。用 GVF Snake 模型检测出人脸的前 4 帧的人脸轮廓位置后,初始化 GM(1,1)模型,便可以利用 GM(1,1)模型预测第 5 帧图像的人脸轮廓位置,作为 GVF Snake 模型迭代依据。这种方法一方面减少了 GVF Snake 模型

的迭代次数,增强了跟踪的实时性;同时将 GVF Snake 模型的迭代后得到的人脸轮廓的质心提供给 GM(1,1)模型“新陈代谢”,使 GM(1,1)模型的预测结果更加精确,从而增强了跟踪的精确性。本文方法减少了其他运动目标的干扰,提高了人脸轮廓提取的抗噪性能,增强了跟踪的精度,用本文算法对单人脸轮廓跟踪的实验结果如图 2(a)所示。用文献[6]中提出的结合肤色模型和 level set 的方法对不存在遮挡的人脸进行跟踪,其实验效果较好,实验结果如图 2(b)所示,但 level set 的迭代次数较多,导致实时性较差。文献[7]提出一种简单背景下图像序列中的人脸轮廓提取与跟踪算法,提出的 level set 加入了卡尔曼滤波器预测机制,减少了 level set 的迭代次数,可以快速找到人脸。但文献[7]假设了目标做匀速运动,因此当人脸运动状态变化时需要及时转换卡尔曼滤波器模型以适应人脸运动状态变化,同时该方法未对遮挡问题给出解决方案,增加了实际应用中的困难,单人脸轮廓实验结果如图 2(c)所示。传统的 mean shift 算法<sup>[15]</sup>因计算量少,实时性强等优点受到广泛应用,但由于用单一的颜色直方图来描述目标特征,有时因缺少空间信息导致算法效果欠佳,基于传统的 mean shift 算法的单人脸轮廓跟踪结果如图 2(d)所示。



(a)本文方法跟踪结果  
(a) Tracking results of this paper



(b) 文献[6]跟踪结果  
(b) Tracking results of reference [6]



(c) 文献[7]跟踪结果  
(c) Tracking results of reference [7]



(d) mean shift 跟踪结果  
(d) Tracking results of mean shift

图 2 单人脸轮廓跟踪结果  
(第 5,20,35,50,65 和 80 帧)

Fig. 2 Results of single face contour tracking(Frame 5, 20, 35, 50, 65 and 80)

#### 4.2 存在遮挡的人脸轮廓跟踪

为有效解决人脸跟踪中人脸被固定物体遮挡的问题,可根据人脸在未被遮挡时人脸的运动区域面积变化不大,存在遮挡时运动人脸面积会急剧减小的特征来判断是否被固定物体遮挡。当判断出存在遮挡时停止 GVF Snake 的迭代,只用 GM(1,1)模型进行预测且以预测位置代替人脸的真实位置,从而保持跟踪的连续性。当检测出运动人脸面积恢复到接近遮挡前的人脸面积,就判定人脸的遮挡消失,重新开始使用 GVF Snake 模型且以 GVF Snake 模型的迭代结果更新 GM(1,1)模型,同时以 GM(1,1)模型的预测值作为下一帧图像的 GVF Snake 模型的迭代依据。存在固定物体遮挡时本文方法对人脸轮廓跟踪结果如图 3(a)所示。文献[6]的方法是存在人脸的前提下可以有效检测出人脸,因此在人脸被树遮挡后便检测不出来,跟踪结果如图 3(b)所示。传统的 mean shift 算法能适应部分遮挡下的目标跟踪,但难以对付严重

遮挡下的目标跟踪,因此在人脸完全遮挡后跟踪失败,实验结果如图 3(c)所示。



(a)本文方法

(a) Tracking results of this paper



(b)文献[6]跟踪结果

(b) Tracking results of reference [6]



(c) mean shift 跟踪结果

(c) Tracking results of mean shift

图 3 存在固定物体遮挡时人脸轮廓跟踪结果 (第 15, 30, 45, 60, 75 和 90 帧)

Fig. 3 Results of face tracking with occlusion of a fix object (Frame 15, 30, 45, 60, 75 and 90)

在实际的人脸轮廓跟踪时,往往会存在人脸相互遮挡的问题,为验证本文方法的有效性,作者室外拍摄了存在相互遮挡的多人脸跟踪序列。GVF Snake 模型的初始化和不存在遮挡时的人

脸跟踪与单人脸轮廓序列的跟踪方法相同。如果检测到不同人脸的轮廓存在相同的坐标点,就判定人脸开始相互遮挡,此时关闭 GVF Snake 模型,只用 GM(1,1)模型预测,并且以预测点代替人脸的真实位置,从而有效解决不同人脸的干扰,保持跟踪的连续性。当不存在相同位置的轮廓点时,本文算法判定相互遮挡结束,重新开启 GVF Snake 模型,以 GM(1,1)模型预测点作为下一帧图像 GVF Snake 模型的迭代依据,并且将 GVF Snake 模型获取的轮廓作为 GM(1,1)模型更新的依据,存在相互遮挡问题的多人脸轮廓跟踪结果如图 4 所示。



图 4 多人脸轮廓跟踪结果

(第 5,20,35,50,65 和 80 帧)

Fig. 4 Results of multi-face contour tracking(Frame 5, 20, 35, 50, 65 and 80)

### 4.3 姿态变化的人脸轮廓跟踪

为进一步验证本文方法的有效性,作者对姿态变化的人脸图像序列进行了跟踪,图 5 是人脸做自由运动的序列结果,跟踪此序列的困难是人脸的运动状态变化非常明显,但 GM(1,1)模型能



图 5 自由运动的人脸轮廓跟踪结果

(第 15,30,45,60,75 和 90 帧)

Fig. 5 Results of face contour tracking with free motion(Frame 15, 30, 45, 60, 75 and 90)

够在线实时更新,因此本文方法很快稳定地跟踪上了人脸轮廓。图 6 是伴随人脸表情和姿态变化的人脸轮廓跟踪结果,序列中人脸由偏转正,然后低头闭目,最后抬头来了一个夸张的表情动作。图 6 的跟踪结果表明本文算法在表情和姿态变化的情况下能较准确地跟踪人脸轮廓。光照变化时人脸表面会发生明显变化,这里拍摄了一组头部由右向左偏的过程中光线明显变化的视频,图 7 的跟踪结果表明在光照变化的情况下本文算法跟踪人脸轮廓的鲁棒性好。



图 6 表情和姿态变化的人脸轮廓跟踪结果  
(第 60,100,130,150,180 和 220 帧)

Fig. 6 Results of face contour tracking under pose variation and facial expression change  
(Frame 60, 100, 130, 150, 180 and 220)

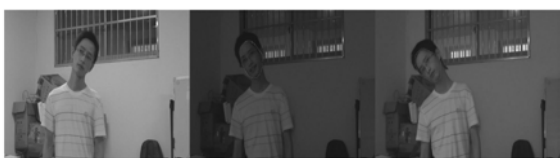


图 7 光照变化的人脸轮廓跟踪结果  
(第 5,46,和 76 帧)

Fig. 7 Results of face contour tracking under illumination variation(Frame 5, 46, and 76)

#### 4.4 人脸轮廓跟踪性能分析

本文对跟踪的时间和误差两个方面的性能与其他文献进行对比。在 1.70 GHz 的 CPU,内存为 1 024 M 的计算机上进行对比实验,GVF Snake 算法跟踪的平均时间是 4.374 6 s/frame,本文算法跟踪的平均时间是 0.349 9 s/frame,跟踪的平均时间仅为 GVF Snake 算法的 8.0%,文献[6]中用肤色模型和 level set 进行人脸跟踪的平均时间是 3.693 3 s/frame,文献[7]的 level set 和卡尔曼滤波器相结合的人脸跟踪算法平均时间

是 1.963 7 s/frame,本文算法与 GVF Snake 算法、文献[6]和文献[7]的跟踪时间对比实验结果如图 8 所示。对图 2 的单人脸轮廓跟踪序列,GVF Snake 算法的平均跟踪误差是 1.149 2 pix-

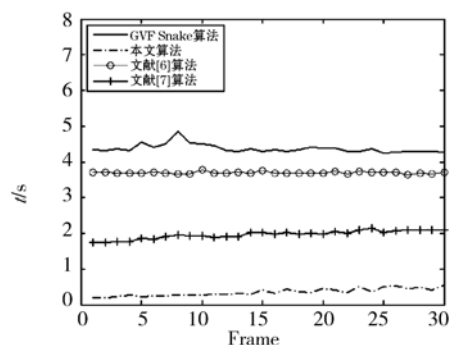


图 8 跟踪时间对比

Fig. 8 Comparison of tracking time

el/frame,GVF Snake 结合 Kalman 算法的平均跟踪误差是 0.617 6 pixel/frame,本文算法的平均跟踪误差是 0.358 9 pixel/frame,平均跟踪误差仅为 GVF Snake 算法的 31.2%,跟踪误差对比的实验结果如图 9 所示。但如果用 GVF Snake 结合 Kalman 的算法跟踪如图 5 所示的自

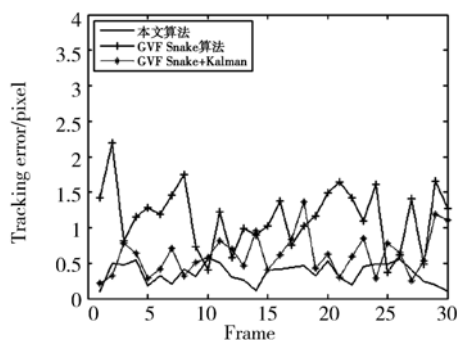


图 9 跟踪误差对比

Fig. 9 Comparison of tracking error

由运动的人脸轮廓,则由于 Kalman 滤波是一种线性滤波器,在人脸机动时需要转换预测模型,累积的误差会导致跟踪误差剧烈增大。灰色系统理论通过对外部行为数据进行灰色生成,降低了数据的随机性。灰色系统可以用较少的数据实时在线地建立 GM(1,1)预测模型,可较准确地预测人脸运动轨迹,且其不像卡尔曼滤波器这类线性预测模型存在模型转换问题。以 GM(1,1)模型预测的质心作为下一帧图像 GVF Snake 模型迭代的依据,降低了被复杂背景干扰的风险,可显著减少计算量。

可见本文方法增强了跟踪的实时性,减少了跟踪误差。由于实际的人脸轮廓边缘在头发线、耳朵和下巴等区域是不连续的,造成检测到的曲线不太光滑,本文方法为得到较平滑的人脸轮廓曲线允许在这些地方检测到的轮廓存在较小偏差。

## 5 结 论

本文提出了视频序列中基于 GVF Snake 和 GM(1,1)模型的人脸轮廓跟踪方法,首先利用人脸的运动信息,对帧间差分图像利用 Otsu 法来自动获取人脸运动区域,消除背景对肤色检测的影响,缩小肤色搜索的范围,并且结合人脸总是位于身体上方的假设获得人脸区域,从而解决 GVF

Snake 初始化问题,然后在此基础上利用 GVF Snake 方法对人脸轮廓进行精确提取,同时也减少了外界环境的干扰。从第 5 帧图像开始利用前 4 帧图像的人脸轮廓质心数据,用 GM(1,1)模型预测下一帧人脸轮廓质心点,从而减少 GVF Snake 模型的迭代次数,增强跟踪的实时性。当判断出存在人脸的互遮挡和被固定物遮挡时,用 GM(1,1)模型的预测值代替真实值,保证了跟踪的连续性。本文算法平均跟踪时间仅为 GVF Snake 算法的 8.0%,平均跟踪误差仅为 GVF Snake 算法的 31.2%,证明了本文方法的跟踪实时性显著增强,跟踪误差明显减少。实验结果表明,本文算法对人脸遮挡,人体姿态变化,人脸表情变化以及光照变化等复杂情况下的跟踪鲁棒性强。

## 参考文献:

- [1] TSAI C Y, DUTOIT X, SONG K T, *et al.*. Robust face tracking control of a mobile robot using self-tuning Kalman filter and echo state network [J]. *Asian Journal of Control*, 2010, 12(4): 488-509.
- [2] YE J H, LIU ZH G, ZHANG J. A face tracking algorithm based on LBP histograms and particle filtering [C]. *International Conference on Natural Computation*, 2010(7): 3550-3553.
- [3] BULBUL A, CIPILOGLU Z, CAPIN T. A color-based face tracking algorithm for enhancing interaction with mobile devices [J]. *Visual Computer*, 2010, 26(5):311-323.
- [4] LUKASZ A S, RAUL V G. Identity recognition-based correction mechanism for face tracking [C]. *Lecture Notes in Computer Science (including sub-series Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 2010, 6169: 203-212.
- [5] 段其昌,周奇,段盼. 结合水平集和粒子滤波的人脸轮廓跟踪[J]. *光电工程*, 2010,37(3):117-121.  
DUAN Q CH, ZHOU Q, DUAN P. Face contour tracking by combing level set method and particle filtering [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010, 37(3):117-121. (in Chinese)
- [6] CHANG J S, KIM E Y, KIM H J. Facial boundary detection with an active contour model [J]. *Pattern Recognition Letters*, 2007, 28(1): 64-74.
- [7] 黄福珍,苏剑波. 基于 Level Set 方法的人脸轮廓提取与跟踪[J]. *计算机学报*, 2003,26(4):491-496.  
HUANG F ZH, SU J B. Face contour extraction and tracking using level sets [J]. *Chinese Journal of Computers*, 2003, 26(4): 491-496. (in Chinese)
- [8] KASS M, WITKIN A. Snakes: Active contour models [J]. *International Journal of Computer Vision*, 1987, 1(4): 321-331.
- [9] XU CH Y, PRINCE J L. Snakes, shapes, and gradient vector flow [J]. *IEEE Trans on Image Processing*, 1998, 7(3): 359-369.
- [10] BRESSON X, ESEDOGLU S. Fast global minimization of the active contour/snake model [J]. *Journal of Mathematical Imaging and Vision*, 2007, 28(2):151-167.
- [11] 范延滨,刘彩霞,贾世宇,等. GVF Snake 模型中初始轮廓线设置算法的研究[J]. *中国图象图形学报*, 2008,13(1): 58-63.  
FAN Y B, LIU C X, JIA SH Y, *et al.*. The research of contour initialization algorithm in GVF snake model [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2008, 13(1): 58-63. (in Chinese)
- [12] 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)

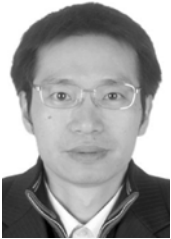
- [13] 孙中森,孙俊喜,宋建中,等.一种抗遮挡的运动目标跟踪算法[J].光学精密工程,2007,15(2):268-272.  
SUN ZH S, SUN J X, SONG J ZH, *et al.*. Anti-occlusion arithmetic for moving object tracking [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15 (2): 268-272. (in Chinese)
- [14] 邓聚龙.灰色系统基本方法[M].2版.武汉:华中科技大学出版社,2005.

科技大学出版社,2005.

DENG J L. *A primary methods of grey system theory*[M]. 2nd ed. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2005. (in Chinese)

- [15] COMANICIU D, RAMESH V, MEER P. Kernel-based object tracking [J]. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2003, 25(5):564-577.

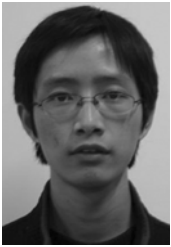
#### 作者简介:



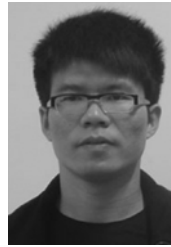
周志宇(1974—),男,浙江诸暨人,副教授,2004年于浙江理工大学获得硕士学位,主要研究方向为计算机视觉、灰色系统理论。E-mail:zhouzhiyu1993@163.com



张建新(1972—),男,湖南桃源人,副教授,1997年于浙江理工大学获得硕士学位,主要研究方向为机器视觉、计算机控制技术。E-mail:zjx@zstu.edu.cn



杨卫成(1986—),男,浙江湖州人,硕士研究生,主要研究方向为计算机视觉。E-mail:ywc313103@126.com



郑磊(1986—),男,浙江衢州人,硕士研究生,主要研究方向为图像处理。E-mail:zhengleiai@sohu.com



汪亚明(1972—),男,浙江衢州人,教授,博士生导师,1997于浙江工业大学获得硕士学位,2000于浙江大学获得博士学位,现任浙江理工大学信息电子学院院长,主要研究方向为计算机视觉与模式识别、医学成像与医学图像处理。E-mail:ywang@zstu.edu.cn