

文章编号 1004-924X(2017)12-3152-08

## 适应移动智能设备的目标跟踪器

熊晶莹, 戴 明\*

- (1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春, 130000;
2. 中国科学院大学 大珩学院, 吉林 长春 130000)

**摘要:**针对增强现实技术在移动智能设备上应用需求,设计了一种适应移动智能设备嵌入式系统的目标跟踪器。在特征描绘阶段采用亮度信息进行二值特征的快速分割并建立强显著性的二值特征描绘器;在特征选择阶段提出一种稀疏跟踪搜索模板进一步提高跟踪算法的执行效率。然后,在跟踪器中建立了存储目标初始信息的静态库与不断更新目标外观或运动变化信息的动态库,通过对比静、动态库与搜索模板区域中的信息确立跟踪目标位置。对跟踪器执行时间进行了对比,结果表明:在保证较高的跟踪精度条件下,采用稀疏搜索模板能明显改善算法的执行时间,将搜索半径设为 10 可在绝大多数情况下满足跟踪器的实时要求。对跟踪器的有效能力亦进行了对比,结果显示:在 3 组不同搜索半径下,提出的 DBRISK 描绘方法的平均跟踪误差相对于 BRISK(Binary Robust Invariant Scalable Keypoints)方法分别下降了 16%、28% 和 29%。实验表明:提出的方法能够明显改善跟踪器的信息提取准确度,适用于计算能力有限的移动智能设备。

**关键词:**二值特征;跟踪器设计;移动智能终端;稀疏搜索模板;增强现实

**中图分类号:**TP273;TP391.4 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20172512.3152

## Design of tracker for mobile smart devices

XIONG Jing-ying, DAI Ming\*

- (1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130000, China;*
  2. *University of Chinese Academy of Sciences, Changchun 130000, China*)
- \* *Corresponding author, E-mail: daim@vip.sina.com*

**Abstract:** To apply augmented reality technology in mobile smart devices, a novel target tracker for the embedded system of a smart mobile device was proposed. In the stage of feature description, the binary feature was segmented rapidly and discriminative binary descriptors were established by fast brightness segment. In the stage of feature matching, a sparse searching template was proposed to improve the execution efficiency of the tracking algorithm. Initial target information was stored in a static library established by the tracker and the change of target appearance was stored in a dynamic library, and the target location was tracked by comparing search information and the templates in libraries. The execution time of the tracker was compared, and the results show that sparse search templates significantly improve the execution time of the algorithm at maintaining a higher tracking accu-

收稿日期:2017-02-23;修订日期:2017-04-08.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61405191)

racy, and setting the search radius to 10 is able to meet the real-time requirements of trackers. The effective capacity of the tracker was compared also. And the results indicate that the tracking error of DBRISK are 16%, 28% and 29% decrease than those of the original BRISK (Binary Robust Invariant Scalable Keypoints) under three different search radii, which means the proposed method significantly improves the accuracy of tracking method, and is applicable to the limited computing power smart mobile devices.

**Key words:** binary feature; design for tracker; smart mobile device; sparse searching template; augmented reality

## 1 引 言

增强现实技术<sup>[1]</sup>是试图建立现实世界信息与虚拟世界信息无缝集成的人工智能超现实感知,随着移动智能设备的普及,其在移动终端上的应用变得更为迫切。增强现实技术严重依赖快速有效的目标识别方法来实现目标位置区域监测<sup>[2]</sup>,但智能移动设备处理器数据吞吐量较低、不支持浮点结构、存储空间有限、存储速度慢以及缓存区较小等缺陷使其嵌入式系统上的移植受到鲁棒性和实时性两方面的挑战,即跟踪算法需要在适应各种目标变化的的前提下满足移动平台严格的实时处理要求。

国内外诸多学者对目标识别与跟踪方法进行了深入研究,其中基于特征提取与检测的方法受到了广泛关注<sup>[3-4]</sup>。为适应移动设备嵌入式系统,PhonySIFT<sup>[5]</sup>采用特征点检测算法(Features from Accelerated Segment Test, FAST)<sup>[6]</sup>进行快速角点分割,代替原尺度不变特征转换算法(Scale-invariant Feature Transform, SIFT)<sup>[7]</sup>算法中采用 DoGs(Difference of Gaussians)提取特征角点,并以尺度因数区分特征描绘器,避免全尺度空间的搜索。PhonySIFT 建立特征描绘器时子区域的划分从  $4 \times 4$  降为  $3 \times 3$ ,并将方向因数从 8 个减少为 4 个,使原始 128 维的描绘器降至 36 维。其实验设备的处理器为 PXA930, 624 MHz, 屏幕分辨率为  $320 \times 240$ ,跟踪算法的勉强达到实时要求,然而算法的有效性却下降了超过 70%。而直接利用灰度图像的亮度信息进行亮度比对,以一组仅有 0 和 1 组成的二值字符串建立起特征角点与其周围区域的联系,使特征描绘器的匹配从欧式空间转向汉明空间。通过异或计算的这类二值特征匹配,处理速度极快且可实现平

行计算,但其鲁棒性较差、特征点对误匹配率较高,常用的算法有 BRISK(Binary Robust Invariant Scalable Keypoint)<sup>[8-9]</sup>、FREAK(Fast Retina Keypoint)<sup>[10-11]</sup>。

本文设计了一种基于二值特征的适应移动智能设备的跟踪器。首先为满足移动智能设备实时性的要求,采用灰度图像亮度比对进行二值特征的快速分割,并通过分析嵌入式平台特性设计了一种增强显著性的二值特征描绘器;然后,为提高跟踪算法执行效率,提出一种稀疏跟踪搜索模板,通过控制搜索半径,在保证一定跟踪精度的条件下,减少跟踪算法的执行时耗;最后,设计了存储目标初始信息的静态库与不断更新目标外观或运动变化信息的动态库,通过对比静、动态库与搜索模板区域中的信息确立跟踪目标位置。实验证明,本文提出的方法在智能移动设备处理器的计算能力有限并存在实时性要求的条件下,展现了良好的普适性,明显增强了跟踪算法在嵌入式系统中的执行能力。

## 2 移动智能设备平台跟踪方法移植

移动智能设备配有前、后双置可见光高清摄像头、光学感应器、光学防抖装置、图像处理芯片、触摸屏及控制器等,摄像镜头随设备移动无额外自由度。用户可通过终端操作调整镜头焦距以改变监控区域范围和选定跟踪目标监控细节。移动智能设备嵌入式系统内核较小、高实时性以及二值特征算法具有快速性的优势使之更适用于移动终端平台的跟踪器设计。

当摄像头捕获到景物后,送显在移动设备的显示屏上,需要观测者手动选取跟踪目标。跟踪方法流程如图 1 所示,本文提出一种基于目标特征模型库的跟踪方法。建立静态库以存储从首帧

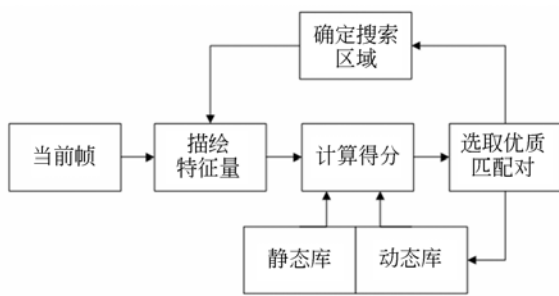


图 1 跟踪方法流程图

Fig. 1 Tracking flow chart

中提取的跟踪目标初始化信息,作为匹配参考模板,可限制跟踪漂移并在全目标模型重合时重建目标信息。动态模型库内容随每帧中目标表面变化更新,可适应目标姿态变化、光照条件改变或存在部分遮挡等场景。模板库被设计为一个先进先出的队列形式,模板库的数量可根据实际情况进行增减,实验中确定为 45,即  $m=45$ 。为提高跟踪算法执行效率,提出一种稀疏跟踪搜索模板,模板的位置根据之前目标的位置确定,模板内部的采样点较为密集,边缘较为稀疏,可通过控制搜索半径来调解采样点的密集程度。进行特征匹配时,通过比较稀疏跟踪搜索模板上  $n$  个采样点和  $m$  个库中模板二值特征描绘器的汉明距离,找到累积差异程度最小的参考采样点,以确定帧内目标位置,更新跟踪目标信息。匹配累积差异程度评价公式为:

$$C_H^i = \arg \min_{t_j \in D} d_H(s_i, t_j), \quad (1)$$

其中,  $s_i$  是搜索模板上第  $i$  个采样点的描绘器,  $t_j$  表示第  $j$  个库中模板,  $d_H(s_i, t_j)$  表示  $s_i$  和  $t_j$  的汉明距离。

### 2.1 跟踪算法的安卓平台移植

跟踪算法在安卓嵌入式系统平台上的移植是使用 Dalvik 虚拟机的本地代码 Java Native Interface (JNI) 开发的,程序结构如图 2 所示。其构建摄像机的模型是基于 OpenCV4 安卓库中的一个控制器模型。安卓库的接口函数是利用 Java 本地化处理的,因此并没有产生额外的虚拟机开销。该模型可实现从相机中直接获取采集到的视频帧,提供无损的连续视频流。而标准安卓库中却未构建这样的交互功能,需通过安卓系统调度将模型帧传给用户编码。一旦摄像机采集到视频图像,需要选取或探测进行搜索跟踪的区域。

然后,初始帧中目标的坐标和内存中当前帧的指针会传送给跟踪器。接下来,跟踪器在目标区域进行相关计算,不断返回后续视频帧中跟踪目标的坐标值。最后,利用 OpenCV4 安卓库中的绘制函数,用彩色的圆圈划出不同算法每帧的跟踪目标区域,并标注相关信息。

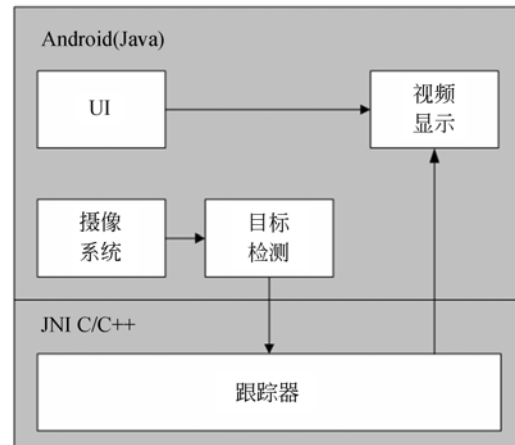


图 2 安卓嵌入式系统的跟踪器设计

Fig. 2 Design of tracker for Android embedded system

### 2.2 跟踪算法的 IOS 平台移植

跟踪算法在 IOS 平台上的移植是基于 Objective-C 语言开发的,它也是一种面向对象的语言,在应用开发中一般遵循 MVC (Model View Controller) 的设计模式,它是 C 语言的一个扩展集,因此可以在 PC 端利用 C 语言和 OpenCV 库函数进行整个算法的预编译。在用户与应用程序的交互上,图像的预处理和最终标注信息的显示是跟踪算法的额外时耗。图像的预处理包括降低原始图像的分辨率和彩色图像的灰度转换,这个阶段的处理时间大概占总时间的 22~26%。而标注信息的绘制导致最终送显阶段的时耗占比高达 37~44%。

## 3 跟踪器系统的关键算法

### 3.1 二值特征描绘器

移动智能设备嵌入式系统的系统精简、内核较小且具高实时性,基于二值特征算法快速性的优势使其更适合移动终端平台的跟踪器设计。在二值特征描绘方法中 BRISK 具有较强鲁棒性,其采样模板上设计了 60 个采样点,如图 3 所示(彩

图见期刊电子版),中间密集边缘稀疏,模板的中心点对应特征角点。通过采样点之间距离设置了长距离点对集和短距离点对集,长距离点对集用以指定描绘器的方向,而短距离点对集用以描绘特征点与周围像素的联系。

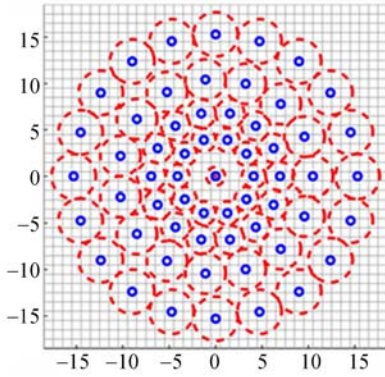


图 3 BRISK 采样模板

Fig. 3 BRISK sampling template

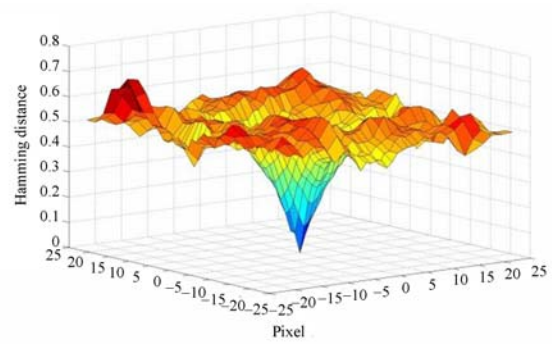
$$\begin{aligned}
 A &= \{(P_i, P_j) \in R^2 \times R^2 \mid i < N \wedge j < i, j \in N\}, \\
 S &= \{(P_i, P_j) \in A \mid \|P_i - P_j\| < 9.75t\} \subseteq A \\
 L &= \{(P_i, P_j) \in A \mid \|P_i - P_j\| > 13.67t\} \subseteq A
 \end{aligned}
 \quad (2)$$

其中:  $A$  表示所有采样点对  $(P_i, P_j)$  的集合,  $S$  为短距离点对,  $L$  为长距离点对,  $t$  为尺度因数。

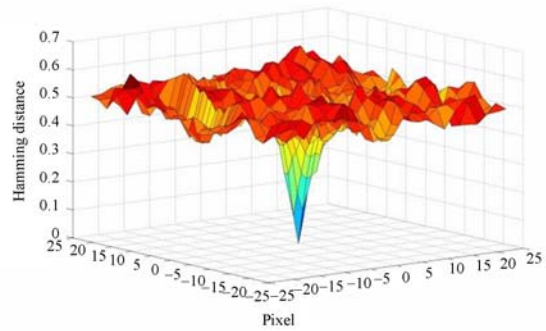
但其建立特征的旋转不变性消耗了大量计算时间却对跟踪精度的影响较小。跟踪器需要能够适应目标外观上的变化,其主要依赖动态库而非描绘器的不变特性。因此,本文设计了一种二值描绘器 DBRISK,借用了 BRISK 的描绘模板,移除原始描绘器的旋转不变性,将原有仅在短距离点对中的亮度比对测试组扩展到整个模板的覆盖区域,远距离点对集中点对的亮度测试可描绘特征点与周围背景的关联程度,近距离点对集中点对的亮度测试可描绘特征点自身的特征,而且去除旋转性质还可加快跟踪方法执行速度。

BRISK 的原始描绘器内部密集边缘稀疏,内部密集的设计更多地提供了目标特征的自信息,而 BRISK 原本用以建立描绘器方向的出于更边缘位置上的采样点,在本文中被扩充为更大范围上建立特征与周围像素的联系,这样内紧外松的设计可在一定程度上防止背景信息更新进库。

图 4 中展示了原始 BRISK 描绘器与本文的 DBRISK 二值描绘器汉明距离表面的对比结果,可见两种描绘方法的模板中心位置都出现了一个



(a) BRISK



(b) DBRISK

图 4 BRISK 与 DBRISK 描绘方法汉明距离表面对比结果

Fig. 4 Hamming distance surface error of BRISK and DBRISK

局部极小值,说明两种描绘器对跟踪目标都具有辨识能力,而 DBRISK 的汉明距离表面起伏程度更为剧烈,则说明描绘器的自身显著性被增强。

### 3.2 稀疏跟踪搜索模板

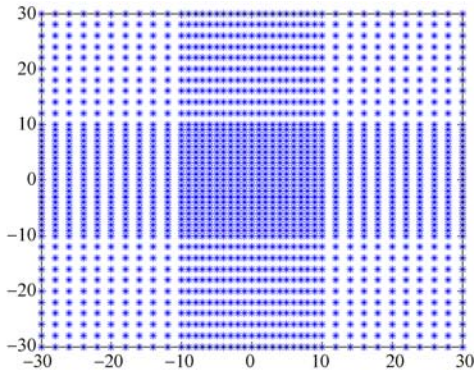
智能移动设备的镜头光圈较小且焦距有限,跟踪目标以小幅度动作和小范围变化为主要运动状态。而跟踪目标的位置和运动均具有连续性,因此跟踪算法无需设定为全尺寸搜索,设计了一种带有尺度特性的稀疏搜索模板,根据跟踪目标可能出现位置的概率对参考帧中目标的近邻域密集搜索,并减少不必要的远距离搜索。搜索区域内采样点的坐标关系在公式(3)和(4)中给出:

$$(x_i, y_i) = (L(i), L(j)), \quad (3)$$

$$L(i) = s * \begin{cases} 2i - \frac{r}{2}, & i \geq \frac{r}{2} \\ 2i + \frac{r}{2}, & i \leq -\frac{r}{2} \\ i, & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (4)$$

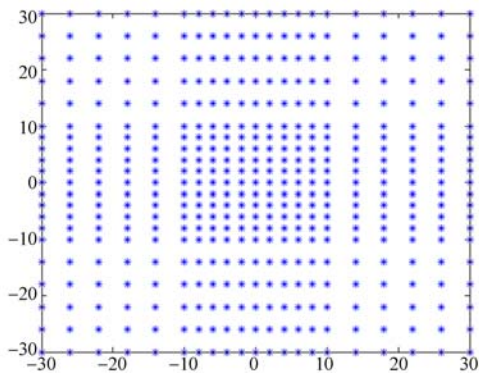
其中,  $L(i)$  和  $L(j)$  为搜索网格上的响应位置,  $s$  为

尺度因子,  $r$  表示搜索半径以及搜索网格密度,  $i, j \in (-r, r)$ 。



(a) 搜索半径为 20, 尺度因数为 1

(a) Search radius with 20 and scale factor with 1



(b) 搜索半径为 10, 尺度因数为 2

(b) Search radius with 10 and scale factor with 2

图 5 不同搜索半径和尺度因子下的稀疏跟踪搜索模板

Fig. 5 Sparse searching template with different search radius and scale factor

图 5 说明了搜索半径和尺度因子对搜索模板的影响。图 5(a) 中模板的搜索半径设为 20, 尺度因数为 1, 网络中共 1 681 个搜索点。图 5(b) 中展示了与 4(a) 中覆盖等同像素尺寸的区域, 而搜索半径减小为 10, 尺度因数为 2, 这样网络中仅有 441 个搜索点。目标运动的动作幅度剧烈程度越低、运动范围越小, 采用稀疏跟踪搜索模板跟踪目标的优势也越明显。但随着搜索半径的增加, 搜索点的密集程度下降, 会导致跟踪精度的降低。跟踪搜索精度和跟踪算法速度的分配也依赖于移动智能设备处理器的计算能力, 用户可根据实际硬件条件控制搜索半径和跟踪精度。

### 3.3 跟踪方法的计算工作量

为了标定跟踪算法的计算工作量, 根据其实现的功能将执行时间划分为 3 个部分: 跟踪方法的特征描绘阶段、特征差异程度匹配计算和特征选择阶段以及算法的其它时耗。特征描绘阶段对所有搜索模板上的采样点建立局部描绘器。在匹配和选择阶段, 通过计算特征描绘阶段建立的描绘器与库中的描绘器模板的汉明距离, 选取最佳匹配项。其它时耗则整合了全部算法执行时间内的其余部分, 其中包含了一些不能被优化的部分, 比如图像的获取和灰度尺度转换。而一个跟踪算法各阶段的执行时间占总计算工作量的百分比即使在不同的设备上保持相应一致。图 6 所示为 BRISK 算法 3 部分随搜索半径变化所占的计算工作量对比结果。

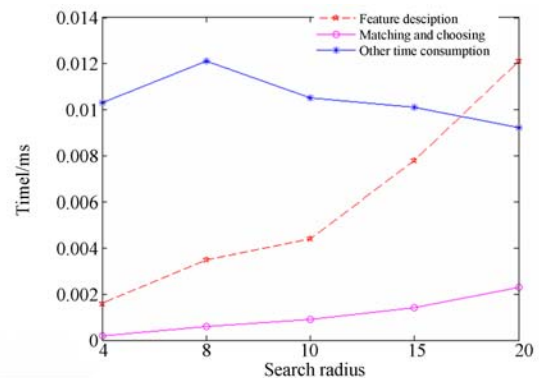


图 6 BRISK 的计算工作量和搜索半径的关系

Fig. 6 Relationship between BRISK calculation workload and search radius

从图 6 中可知, 特征差异程度匹配计算和特征选择阶段的时耗极少, 不超过算法整体执行时间的 15%, 对计算时间的影响有限, 进行优化提升的空间也不大。而特征描绘器的生成阶段则消耗了超过 56% 的每帧处理时间, 但通过控制稀疏跟踪搜索模板的搜索半径, 抑制采样点个数, 可有效减少建立描绘器时间。比如, 搜索半径为 10 时特征描绘的时耗相对于搜索半径为 20 时下降了约 2/3。

## 4 实验结果与分析

### 4.1 实验平台的搭建

针对适应移动智能设备的跟踪器方法, 分别

设计了算法执行时间对比实验和算法有效性验证实验。在算法执行时间对比实验中,所采用的移动设备的处理器能力和内存大小对执行时间有直接影响。因此,本文在多种移动设备上进行跟踪算法计算时间实验。表 1 中给出了所采用移动设备的相关信息。在跟踪算法有效性验证实验中,本文测试了在视频帧存在光照条件改变、旋转、尺度变化和受到遮挡时跟踪器的适应能力。

表 1 实验设备信息

Tab. 1 Equipment devices

设备	运行系统	CPU	镜头/( $\times 10^4$ pixel)内存		
			前置	后置	/GB
Apple iPhone6	IOS 10.2.1	Apple A8 双核 64 位 1.4 GHz	120	800	1
Apple iPad PRO 12.9 in	IOS 10.2.1	Apple A9 双核 64 位 2.26 GHz	120	800	4
Samsung GALAXY Note5	Android 6.0.1	三星 Exynos 7420 八核 2.1 GHz (大四核), 1.5 GHz (小四核)	500	1 600	4

### 4.2 算法执行时间对比实验

影响跟踪算法处理时间的只要因素是算法描绘器的选取和搜索半径的大小。跟踪器每秒帧频的实验结果在表 2 中给出。从表 2 中数据可知,选取不同的描绘器,跟踪算法的执行速度也存在明显的差异,经改进后的 DBRISK 描绘器的处理时间相较原始描绘器有所下降。此外,搜索半径越大则算法执行时间越长,和前文理论分析结果相一致。因此,搜索半径的选取应权衡移动设备的处理能力和预期目标跟踪的精度。

通过比较表 2 中的数据可知,跟踪算法在 IOS 平台上的运行速度明显快于 Android 平台,这种明显的差距可能是由于 IOS 平台算法设计时直接采用了本地编码,而安卓平台则需借助 JNI 接口函数。结果还表明在 IOS 平台上不同搜索半径下所有的二值描绘器跟踪算法都能满足实时性的要求,而安卓平台则需要限制搜索半径。此外,安卓和苹果设备采用了不同的处理器也对算法的执行时效产生影响。虽然在安卓平台上跟

踪器计算时间过长,但也能适用于一些目标变化不剧烈的情况。

表 2 跟踪器处理能力比对实验结果

Tab. 2 Results of average frame rate ( $f \cdot s^{-1}$ )

设备 分辨率	算法	搜索半径				
		4	8	10	15	20
2 732 $\times$ 2 048 IPad	PhonySIFT	38.3	31.2	26.4	21.6	19.2
	BRISK	96.6	73.9	68.2	61.1	50.2
	FREAK	84.8	77.6	73.6	60.9	46.7
	DBRISK	124.4	105.6	89.5	76.8	65.9
1 334 $\times$ 750 IPhone6	PhonySIFT	35.2	28.1	24.3	17.9	14.7
	BRISK	83.7	69.8	64.5	53.1	39.2
	FREAK	82.7	67.6	59.7	52.0	40.6
	DBRISK	111.0	99.4	83.9	68.4	54.5
2 560 $\times$ 1 440 Android	PhonySIFT	7.6	6.8	6.4	5.1	4.3
	BRISK	19.1	17.2	16.3	12.7	10.3
	FREAK	18.7	16.8	15.9	11.3	9.2
	DBRISK	28.8	23.9	21.8	19.1	15.8

### 4.3 跟踪算法有效性验证实验

为了验证跟踪算法的有效性以及采用稀疏搜索模板未对跟踪算法造成负面影响,设计了 3 组实验。首先,跟踪器分别在原始搜索模式中运行,即搜索半径为 20,尺度因数为 1;然后设计两组稀疏搜索有效性实验:搜索半径设为 10、尺度因数设为 2;搜索半径设为 5、尺度因数设为 4。这 3 组实验的搜索区域的覆盖面积一致,唯一的变量就是区域内的搜索点个数。实验视频截图如图 7 所示。分别是(a)人脸识别(视角变换)、(b)人民币(表面变化)、(c)药瓶(小角度旋转)、(d)封面书(部分遮挡、轻微缩放)、(e)远景 1(平面移动)、(f)远景 2(缩放)、(g)卷笔刀(平移、旋转)和(h)车辆(平移、小幅度缩放、抖动)。实验结果见表 3,从

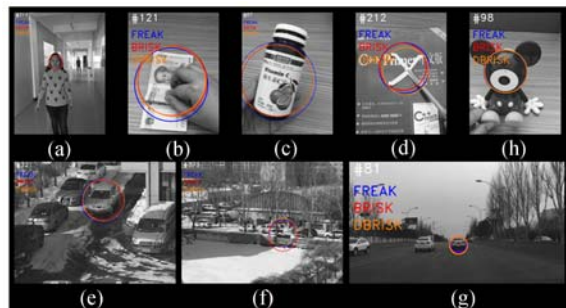


图 7 算法有效性验证实验视频帧的截图

Fig. 7 Experiment video frame captures

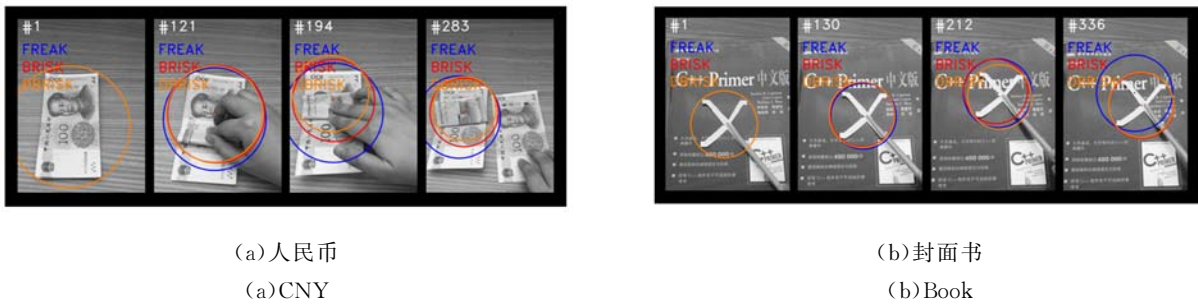


图 8 跟踪实验效果展示截图

Fig. 8 Results of tracker

表 3 平均跟踪误差

Tab. 3 Average tracking error

(pixel)

描绘器	搜索点数	实验视频源							
		人脸	封面书	药瓶	人民币	远景 1	远景 2	卷笔刀	车辆
BRISK	1 681	6.78	2.89	15.85	3.52	2.65	25.05	1.53	3.63
	441	8.53	8.34	20.17	5.28	5.96	38.02	2.14	7.78
	121	12.32	13.55	24.73	27.44	21.06	40.65	10.85	19.64
FREAK	1 681	6.82	5.73	16.07	3.71	5.50	25.77	1.56	4.66
	441	7.41	9.92	22.67	8.46	11.95	12.20	3.90	10.34
	121	12.32	16.55	27.13	31.27	21.06	40.65	12.06	23.07
DBRISK	1 681	4.95	2.82	15.24	3.16	2.38	11.51	1.49	2.96
	441	6.40	5.04	17.58	4.12	3.35	27.13	2.14	7.74
	121	11.27	11.21	25.30	15.23	4.03	27.81	10.73	16.17

中可知密集程度越高地特征搜索其目标跟踪精度也越高。

由于 DBRISK 通过在特征描绘阶段将亮度比对测试扩展到 BRISK 采样模板的全区域,增强了描绘器的显著性。图 8 展示的跟踪效果实验中,FREAK 算法辨别背景信息和跟踪目标的能力较差,BRISK 算法和本文算法跟踪能力较强,由表 3 可知,在跟踪有效性实验中,DBRISK 的平均跟踪误差值更小,表明跟踪精度较高。从表 3 中还可发现在选取搜索半径为 10 的中等密度搜索中,搜索点的个数仅为原有的 26%,却展现了相近的跟踪能力搜索结果。实验结果也证明了采用稀疏跟踪搜索模板能有效改善跟踪方法的执行效率且没有明显的精度损失。

## 5 结 论

本文设计了适应移动智能设备嵌入式系统上的目标跟踪器。针对移动终端处理器能力有限,

首先创建了基于二值特征的 DBRISK 描绘器,其有着较高精度的跟踪能力和极快的处理速度。然后提出了稀疏跟踪搜索模板,通过控制搜索区域内搜索半径使算法的执行效率得到有效提升。搜索半径的选取需要权衡期望目标跟踪精度和处理器计算能力,如果搜索模板过于稀疏,则会严重影响跟踪精度。在构建跟踪器时,建立了存储目标初始信息的静态库与不断更新目标外观或运动变化信息的动态库,通过对比静、动态库与搜索模板区域中的信息实时确立跟踪目标位置。跟踪器执行时间对比实验表明,在保证较高的跟踪精度条件下,采用稀疏搜索模板能明显改善算法的执行时间,将搜索半径设为 10 可满足绝大多数情况跟踪器的实时要求。在跟踪器有效能力对比实验中,在 3 组不同搜索半径下,提出的 DBRISK 描绘方法的平均跟踪误差相对于 BRISK 方法分别下降了 16%、28% 和 29%,说明该方法能够明显改善跟踪器信息提取的准确度,可适用于有限计算能力的移动智能设备。

## 参考文献:

- [1] 陈和恩. 基于单目摄像机的增强现实场景感知技术研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2016.  
CHEN H N. *Monocular Camera based Perception in Augmented Reality Scene* [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2016. (in Chinese)
- [2] 聂海涛. 基于图像局部特征的康复机器人目标识别方法研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2015.  
NIE H T. *Study of Rehabilitative Robotics Object Recognition Method Based on Local Image Feature* [D]. Changchun: Institute of Optics, Fine Mechanic and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2015. (in Chinese)
- [3] 刘迎, 王朝阳, 高楠, 等. 特征提取的点云自适应精简[J]. 光学精密工程, 2017, 25(1): 245-254.  
LIU Y, WANG CH Y, GAO N, *et al.*. Point cloud adaptive simplification of feature extraction [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(1): 245-254. (in Chinese)
- [4] 屈玉福, 刘子悦, 江云秋, 等. 自适应变尺度特征点提取方法[J]. 光学精密工程, 2017, 25(1): 188-197.  
QU Y F, LIU Z Y, JIANG Y Q, *et al.*. Self-adaptive variable-metric feature point extraction method [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(1): 188-197. (in Chinese)
- [5] WAGNER D, REITMAYR G, MULLONI A, *et al.*. Real-time detection and tracking for augmented reality on mobile phones[J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2010, 16(3): 355-368.
- [6] MAIR E, HAGER G D, BURSCHKA D, *et al.*. Adaptive and generic corner detection based on the accelerated segment test [C]. *Proceedings of the European Conference on Computer Vision (ECCV 10)*, Springer, 2010.
- [7] LOWE D G. Object recognition from local scale-invariant features [C]. *The proceedings of the 17th IEEE International Conference on Computer Vision*, IEEE, 1999, 1150-1157.
- [8] 何林阳, 刘晶红, 李刚, 等. 改进 BRISK 特征的快速图像配准算法[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(8): 2722-2727.  
HE L Y, LIU J H, LI G, *et al.*. Fast image registration approach based on improved BRISK [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(8): 2722-2727. (in Chinese)
- [9] 吉淑娇, 朱明, 雷艳敏, 等. 基于改进运动矢量估计法的视频稳像[J]. 光学精密工程, 2015, 23(5): 1458-1465.  
JI SH J, ZHU M, LEI Y M, *et al.*. Video stabilization with improved motion vector estimation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(5): 1458-1465. (in Chinese)
- [10] WHITEN C, LAGANI? RE R, BILODEAU G A. Efficient action recognition with MoFREAK [C]//2013 *International Conference on Computer and Robot Vision (CRV)*, IEEE, 2013.
- [11] MINNEHAN B, SPANG H, SAVAKIS A E. *Robust and Efficient Tracker Using Dictionary of Binary Descriptors and Locality Constraints* [M]//Bebis G. *Advances in Visual Computing*. ISVC 2014. Cham: Springer, 2014.

## 作者简介:



熊晶莹(1989—),女,吉林长春人,博士研究生,主要从事图像处理和信息通讯方面研究。Email: xiong\_ ing @ 163. com



戴明(1965—),男,湖北潜江人,博士生导师,研究员,1993年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位。主要从事光电平台稳定技术、图像稳定技术及航空光电成像技术方面的研究。E-mail: daim@vip. sina. com