

## 拼接式交互桌面上的标记设计与识别\*

王运涛<sup>+</sup>, 喻纯, 秦永强, 史元春

(清华大学 计算机科学与技术系, 北京 100084)

### Marker Design and Recognition on Tiled Interaction Tabletop

WANG Yun-Tao<sup>+</sup>, YU Chun, QIN Yong-Qiang, SHI Yuan-Chun

(Department of Computer Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

+ Corresponding author: E-mail: w.yuntaosea@gmail.com

Wang YT, Yu C, Qin YQ, Shi YC. Marker design and recognition on tiled interaction tabletop. *Journal of Software*, 2011,22(Suppl.(2)):80-88. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/11028.htm>

**Abstract:** This research designs and implements a marker recognition system that allows detection of tangible objects on a very large tabletop system. The design of the system is challenged by constraints including minimal distinguished size, non-linear imaging of the camera and areas of blind region caused by initiative IR illumination. After iterating through several designs, the study proposes the uMarker, an image-coding paper marker. Compared to the widely used reactIVision, it is 75.7% smaller in size and 16.7% higher in coding capacity. The marker recognition system recognizes uMarker through image processing, which achieves good performances on capacity, recognition accuracy and efficiency. Furthermore, it can distinguish between fingers and uMarker and remove duplicated markers. In conclusion, uMarker extends the tabletop system with the ability to recognize tangible objects including information about location, direction and category.

**Key words:** interactive tabletop; marker; marker recognition

**摘要:** 为超大幅面拼接式交互桌面设计实现了标记识别系统. 标记是一种图形编码, 为实物交互提供信息标记. 设计标记识别系统受到包括最小识别尺寸、低精度的长度识别、交叠区面积等条件的约束. 提出的标记 uMarker, 具有尺寸小、编码容量大的特点, 与著名的 reactIVision 的小型标记相比, 标记面积缩小 75.7%, 数量增多 16.7%. 标记识别系统通过图像处理的方式对 uMarker 进行识别, 在同时识别数量、识别效率和识别速度方面性能优越, 并解决了 uMarker 的引入导致的误识别和反复识别问题. uMarker 可以提供实物的位置、方向和分类信息, 扩展了桌面的实物交互能力.

**关键词:** 交互桌面; 标记; 标记识别

大屏幕上的自然交互技术是人机交互领域中一个备受关注的研究方向. 其中, 交互式桌面因其桌子的物理形态更加符合人们已经习惯的“人桌”工作环境、多人“围桌而论”的研讨环境, 近年逐渐成为一个研究热点<sup>[1,2]</sup>. 多人交互式桌面在应用上具有近距俯视观察、多人合作的特点. 而在硬件条件上, 由于需要容纳多用户并发交互<sup>[3]</sup>和承载丰富的信息内容, 多人交互式桌面则具有大幅面(100 英寸以上)和高分辨率的特点. 交互桌面可以支

\* 基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)(2009AA01Z336)

收稿时间: 2011-07-15; 定稿时间: 2011-12-02

持手指、输入笔和物体与桌面的直接交互,输入识别一般采用红外背光技术(IR)来实现.在该方案中,投影显示和输入识别的物理光路是复合的.而另一方面,多人交互式桌面需要通过多屏拼接来构建,与构建单体的交互式桌面不同,拼接式交互桌面的设计需要在显示均匀性上需要有更高的标准.这就给显示光路的设计带来了更多的限制,进而对以触点识别技术提出了挑战.

交互桌面上的实物识别是通过附在物体下表面的标记识别实现的.标记应该具有 3 个基本信息:位置、方向和编码信息.目前交互桌面上的标记设计有多种参考方案,比如 RFID 标记<sup>[4]</sup>、reactIVision<sup>[5,6]</sup>标记、Surface<sup>[7,8]</sup>标记和 FLARToolKit<sup>[9]</sup>标记.但是,由于拼接式交互桌面对标记的设计和识别提出了更高的要求,这些标记都不能工作在 uTable 上,因此需要设计新的方案.

本文为拼接式交互桌面设计实现了实物标记 uMarker 及其识别系统,并详细分析讨论了拼接式交互桌面 uTable 对 uMarker 在规格、样式和编码的设计上带来的约束,包括最小识别尺寸、低精度的长度识别和交叠区面积约束.标记识别系统能够识别 uMarker 的位置、方向和编码,在识别效率、识别速度和同时可识别数量上性能优越.同时,解决了由 uMarker 的引入带来的误识别和反复识别的问题.

## 1 研究背景和相关工作

### 1.1 拼接式交互桌面

拼接式交互桌面,由多个子桌面构成,一般采用背投的方式显示.背投投影机的投影成像存在中间亮周围暗的问题,会导致拼接桌面显示亮度不均匀.

清华大学负责的国家重点项目-大幅面多用户交互桌面关键技术及样机研究(简称 uTable)是一个无缝拼接的超大幅面的交互桌面,由 10 个子桌面按 5×2 的方式无缝拼接而成.显示像素为 3840×2048,显示尺寸 3810mm×2032mm,桌面下是设置有红外散射光源.在交互过程中,桌面上的手指触摸、输入笔<sup>[10]</sup>和标记物等交互输入通过反射红外光或主动发射红外光.该信号由红外摄像机捕捉并完成识别.

为了获得均匀的显示效果,uTable 的显示光路中包括了菲涅尔镜、成像层和保护玻璃等部分,其显示均匀性达到 80%,满足大幅面桌面的应用需求.但是,该光学结构同时也为触点识别提出了挑战.具体来说,(1) 如果桌面上反射光强度不足,会使得摄像头捕捉中的图像信噪比过小而无法完成触点的有效识别.(2) 菲涅尔镜的使用增强了镜面反射,使得光斑的面积增大,光斑中的触点在理论上是无法识别的.为了避开光斑对输入的影响,每个子桌面使用了 4 个摄像头相互配合来覆盖整个桌面,各个摄像头之间存在着交叠区.(3) 材料的漫反射特性和摄像头的畸变导致了低精度的长度识别.第 1.3 节将详细介绍这 3 个约束.

### 1.2 交互桌面标记

实物标记包含的信息如下:

- (1) 位置信息( $x, y$ );
- (2) 方向信息( $r$ );
- (3) 编码信息(ID),用于标记不同的实物.

实物标记分为两种:主动标记和被动标记.主动标记,比如,RFID 或者有源标记可以通过额外的硬件通道提供位置、方向和编码信息.但是,它们往往体积较大,影响使用效果.被动标记,比如,reactIVision<sup>[5,6]</sup>标记、FLARToolKit<sup>[9]</sup>标记等针对单桌体设计的实物标记,不适合在拼接交互式桌面上使用.图 1 左图为 reactIVision 标记实例,编码以树形结构编码.外面的黑框为边界,白色底为根节点,黑色的点为中间层节点,白色点为叶子节点.图 1 右图的 FLARToolKit 的 marker 则直接采用了二维码的设计,并做了相应改进来提供位置和方向信息.



Fig.1 Marker designs of reacTIVision (left) and FLARToolKit (right)

图 1 左为 reacTIVision 的标记,右为 FLARToolKit 的标记

### 1.3 拼接式交互桌面上标记识别的约束

#### 1.3.1 最小识别尺寸

在基于图像处理的实物过程识别中,不可避免地受到噪声干扰,噪声大小一般为 1~2 个像素点.要将噪声屏蔽,必须保证最小距离能与噪声区分,以便通过滤波完成噪声的屏蔽,这就要求摄像机在长度上获得的像素不得少于 2 个.

如图 2 所示,经过对实际边长为 1mm~12mm 的不同的测量,理想的分析中,最小识别尺寸是 4mm,在此边长下,识别到的像素数在 2~4 个像素.由图 2 可知,在 4.6mm 的点,获得斜率瞬时最大值,这个点是长度使用效率 (pix/mm)最大的点.但是,考虑到实际制作的难度和 uMarker 的样式设计,采用边长 5mm 为标记点的边长.

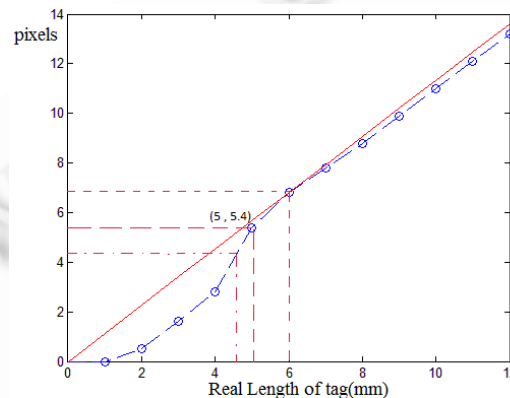


Fig.2 Curve of "pix-mm" of uTable

图 2 uTable 上“素点数量-实际长度”变化曲线

#### 1.3.2 低精度的长度识别

两个原因导致长度识别能力差.首先,红外光摄像机获取的图像发生畸变,在保证识别速度的前提下,没有图像校准,使得图像的射影变化无法得到矫正,如图 3 左图所示,同一摄像头下,不同区域的识别长度不同;其次是材料的漫反射特性,材料反射后长度增长和实际长度增长不成线性比例,导致长度识别上存在误差.如图 3 右图所示,在同一个区域内,实际点的边长分别是 4mm 和 5mm,识别的图像中比例却接近 1:2.又如图 2 所示, 4mm 边长在摄像头下长度上的像素数大致是 5mm 边长的一半.



Fig.3 Left: Display of distortion; Right: Display of material caused error

图 3 左图:图像畸变的图像;右图:材料引起的误差的对比图

### 1.3.3 交叠区面积

uTable 存在交叠区,因为输入信号由 4 个摄像头获取,每个摄像头负责一定的区域信息获取.如果标记的面积大于交叠区面积则会导致如果标记跨越这个交叠区,4 个摄像头都无法获得完整的标记信息,从而在原理上无法识别标记.

图 4 中,左图是 uTable 摄像头捕捉的  $45\text{mm}\times 45\text{mm}$  的区域大小,如果大于这个面积则不能得到完整的标记信息;右图是摄像头捕捉到的  $35\text{mm}\times 25\text{mm}$  的区域,可以被完整地检测到.经过实际测量,确定交叠区的面积是  $45\text{mm}\times 45\text{mm}$ .

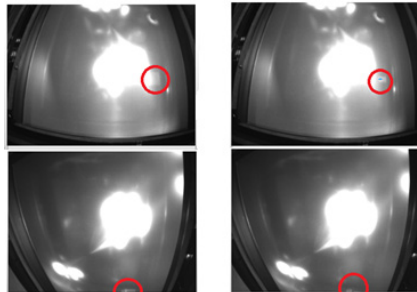


Fig.4 Left: Area of  $45\text{mm}\times 45\text{mm}$ ; Right: Area of  $35\text{mm}\times 25\text{mm}$

图 4 左图: $45\text{mm}\times 45\text{mm}$  区域;右图: $35\text{mm}\times 25\text{mm}$  区域

综上,uTable 上的最小识别尺寸是  $4\text{mm}$ ,交叠区的大小是  $45\text{mm}\times 45\text{mm}$ ,并且存在低精度的长度识别问题,相关工作中提及的标记设计方案不能同时满足上面 3 个约束,FLARToolKit 标记因为低精度的长度识别无法在 uTable 上工作,而 reacTIVision 标记达不到最小识别尺寸和交叠区的双重约束.第 2 节将会给出满足 3 个约束的标记设计方案.

## 2 标记的设计

本文设计的标记 uMarker,从规格、样式和编码方面完全以第 1.2 节中提供的 3 个约束为参考完成设计,下文加以分述.

### 2.1 规格设计

点阵中的点边长设计为  $5\text{mm}$ , $45\text{mm}\times 45\text{mm}$  的交叠区面积上最多可以实现  $9\times 9$  的二维编码,考虑到黑白相间的样式设计,最多实现  $5\times 5$  的点阵编码.为了可靠性,我们采取的是  $4\times 3$  点阵编码的设计方案(如图 5 中间图所示),标记规格设计为  $35\text{mm}\times 25\text{mm}$ .

### 2.2 样式设计

图 5 左图中,在  $7\times 5$  的二维编码中,只有有效(白)和无效(黑)两种状态,由于对长度的识别精度低,长度信息不可用,在样式设计中,采用无长度信息黑白相间设计方案,避开长度识别精度低的约束,变成  $4\times 3$  的点阵编码.如图 5 右图所示,五角星指示的长方形区域为 Position Bar,占用  $3\times 1$  的点阵编码,四角星指示的正方形区域为 Orientation Tag,始终有效,其余的正方形区域为 Code Tag,每个大小是  $5\text{mm}\times 5\text{mm}$ .基于该样式设计,标记的位置信息和方向信息,定义如下:

位置信息:Position Bar 中心位置;

方向信息:Orientation Tag 中心位置到 Position Bar 中心位置的方向.

### 2.3 编码设计

编码中,有效编码为 1,无效编码为 0,8 个 Code Tag 可以是有效或者无效,如图 5 右图所示,标记的编码是:011101111.如果 Code Tag 有效数量少于 3 个(总体有效的 Tag 少于 5 个)则会使某些手指摆放方式被误识别

为标记.同时,考虑到标记的区分度和应用需要,采用 6 个有效 Code Tag 的设计方案,有  $C_8^6 = 28$  个可区分的标记.如果有其他数量需求,可以使用其他个数的有效 Code Tag 方案.

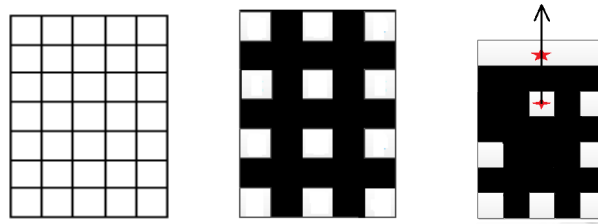


Fig.5 Designation of uMarker

图 5 uMarker 标记的设计

表 1 是 uMarker 设计方案与 reactIVision 标记设计方案的对比,其中,点的面积都是  $5\text{mm} \times 5\text{mm}$ .从表中可以得出以下结论,uMarker 面积只有 reactIVision 标记面积的 24.3%,编码数量上增多 16.7%,uMarker 在编码方案上优于 reactIVision 标记.

Table 1 Comparison between designs of uMarker and reactIVision

表 1 uMarker 设计和 reactIVision 标记设计对比

标记设计	规格	编码方案	编码个数
uMarker	$35\text{mm} \times 25\text{mm}$	二维点阵编码	28 个
reactIVision 标记 <sup>[11,12]</sup>	$60\text{mm} \times 60\text{mm}$	树形编码	24 个

## 2.4 标记识别算法

### 2.4.1 Tag 图像提取

Position Bar 的提取利用椭圆连通域的长轴长度和长度与短轴的比值来寻找 Position Bar,如果长轴长度落在某个区间内并且比值也在特定区间内(本文中选取长轴长度的像素点区间为 $[15,30]$ ,比值区间为 $[3,7]$ ),则认为识别到 Position Bar.

Tag 的提取分两种:Orientation Tag(0 所在区域)和 Code Tag(1-8 所在区域).首先,在距离 Position Bar 一定距离的范围内(本文中为 40 像素点)寻找连通域信息,记录超过一定边长阈值(本文中阈值区间为 $[3,6]$ )的连通域,识别为 Tag.之后,对所有 Tag,计算距离 Position Bar 最近的 Tag 记为 Orientation Tag,其他所有 Tag 记为 Code Tag.

### 2.4.2 Tag 的编码识别

针对编码识别需要构建一个 Tag 解码表,以确定每个 Tag 在 uMarker 中的相对位置.以下是 Tag 解码表构造过程:

假设 Position Bar 中心位置为  $A = (x_0, y_0)$ , 每个 Tag 的中心位置为  $P_i(x_i, y_i) (i = 0, 1, \dots, 8)$ , 记 Orientation Tag 到  $A$  距离为  $D$ , 方向为  $O$ , 如果记  $A$  到  $P_i$  的距离为

$$D_i = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2}, \quad i = 0, 1, \dots, 8 \quad (1)$$

计算得到 2,3,4,6,7 到  $A$  的距离是  $\sqrt{2}D, 2D, \sqrt{5}D, 3D, \sqrt{10}D$ , 将距离归一化, 获得距离比如下:

$$L_i = \frac{D_i}{D}, \quad i = 0, 1, \dots, 8 \quad (2)$$

得到  $L_0 \sim L_8 : 1, \sqrt{2}, \sqrt{2}, 2, \sqrt{5}, \sqrt{5}, 3, \sqrt{10}, \sqrt{10}$ .

在 uMarker 如图 6 所示的放置情况下, 计算每个 Tag 到  $A$  的方向如下:

$$O_i = \arctan\left(\frac{y_i - y_0}{x_i - x_0}\right) \times 180 / \pi, \quad i = 0, 1, \dots, 8 \quad (3)$$

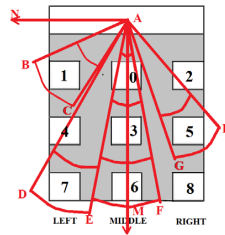


Fig.6 Graph of calculation method on uMarker  
图 6 uMarker 计算方法示意图

将距离比进行一定的扰动  $\Delta$ , 增加区间信息, 如果利用(2)计算得到的某个 Tag 的距离比为  $L$ , 设  $L_{\min} = L - \Delta, L_{\max} = L + \Delta$ , 则增加区间信息后距离比变为  $[L_{\min}, L_{\max}]$ ;

将方向信息增加扰动  $\Delta$ , 如果方向为  $O$ , 设  $\alpha = O - \Delta, \beta = O + \Delta$ , 增加区间信息后变为  $[\alpha, \beta]$ .

经过以上分析, 可以构建一个 Tag 解码表见表 2, 其中以 AN 角度为  $0^\circ$ .

Table 2 Tag decoding table  
表 2 解码使用的 Tag 解码表

编号	0	1	2	3	4	5	6	7	8
$L_{\min}$	-	1.00	1.00	1.55	1.85	1.85	2.6	2.75	2.75
$L_{\max}$	-	1.85	1.85	2.45	2.70	2.70	3.4	3.60	3.60
$\alpha$	-	$23.5^\circ$	$123.0^\circ$	$80.0^\circ$	$45.0^\circ$	$110.0^\circ$	$80.0^\circ$	$60.0^\circ$	$100.0^\circ$
$\beta$	-	$57.0^\circ$	$156.5^\circ$	$100.0^\circ$	$70.0^\circ$	$135.0^\circ$	$100.0^\circ$	$80.0^\circ$	$120.0^\circ$
对应位	第 2 位	第 1 位	第 3 位	第 5 位	第 4 位	第 6 位	第 8 位	第 7 位	第 9 位

每当识别到一个 Tag 时, 按照 Tag 解码表来查询, 首先判断距离比所在区间, 再判断方向所在区间, 如此可以从 Tag 解码表中得到此 Tag 的编码和对应位.

### 2.4.3 标记识别流程

对于摄像头获得的图像, 按照以下步骤完成 uMarker 的识别:

- (1) 图像 Tag 提取得到 Position Bar、Orientation Tag 和 Code Tag 信息.
- (2) 记录 Position Bar 中心位置为标记的位置信息, 记录 Orientation Tag 中心位置到 Position Bar 中心位置的方向为标记方向信息.
- (3) 对 Code Tag 进行编码识别, 按照 Tag 解码表获得每个 Code Tag 的编号和对应位.
- (4) 构建长度为 9 的二进制串, 在(3)得到的对应位上写入“1”, 其余写入“0”.
- (5) 如果二进制串中“1”的个数为 7, 则标记识别完成; 否则, 采用历史信息预测的方法, 利用最近几帧中 A 点位置上记录的 uMarker 信息作为识别到的标记信息.

## 3 系统实现

标记识别系统 uMatch 需要识别 uMarker 的位置、方向、编码等信息. uMatch 系统经过图像处理、标记识别、输入融合获得手指触点、笔点和 uMarker 这些输入信号.

### 3.1 系统结构

#### 3.1.1 图像处理模块

uMarker 的图像处理如图 7 所示, 经过高斯滤波、背景差分、二值化处理之后完成区域划分, 构建连通域, 记录每个连通域的上下左右极值信息和长轴、短轴信息. 将信息传输到标记识别部分.

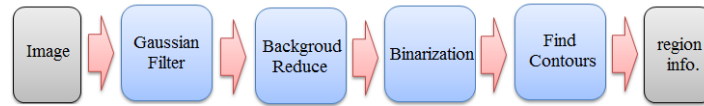


Fig.7 Image process method

图 7 图像处理方法

### 3.1.2 标记识别模块

考虑如下 3 种可能存在的标记识别情况:

- (1) 识别到完整的 uMarker 信息,计算出 uMarker 信息;
- (2) 没有识别到完整的 uMarker 信息,通过历史信息预测获得 uMarker 的信息;
- (3) 获得的 uMarker 信息有噪点,无法完成识别,通过历史信息预测完成识别.

使用第 2.4 节中的标记识别算法,完成这 3 种情况的标记识别.

### 3.1.3 输入融合模块

本地信息融合中,有 symbol ID 域和 Session ID 域,symbol ID 域指明了消息的分类,Session ID 作为信息更新域,保证信息的实时更新.symbol ID 有两种,一个值是 0,一个值是 1.其中,0 代表了手指信息,1 代表了笔点信息.uMarker 的融合,需要修改这个信息域, symbol ID 为 11-38 作为 uMarker 的 ID 号,用于制作 uMarker 的信息包.在融合和通信部分,屏蔽了 uMarker 引起的手指指点误识别以及 uMarker 之间的反复识别.这个部分在第 4 节中独立加以阐述.

与 reactIVision 一样,识别系统通信采用了 TUIO 协议<sup>[12]</sup>来传输数据.如图 8 所示,所有的手指触点、笔触点和 uMarker 这些输入信号经过本地的信息融合,将 4 个摄像头获得的数据进行综合,再经过所有 PC 机信息的总融合,经过 TUIO 协议传输到应用程序.

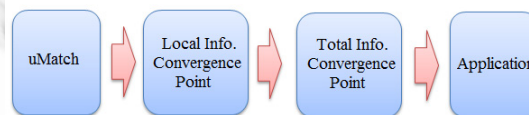


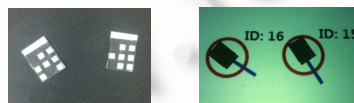
Fig.8 The transfer path of recognition information to the application

图 8 识别信息传送到应用经过的传输路径

## 3.2 系统识别性能

最终在桌面上的识别效果如图 9 所示.识别系统达到以下的识别性能:

- (1) 采用 6 个 Code Tags 的设计方案 uMatch 实现了 28 个编码标记 uMarker 的识别,可准确得到 uMarker 的位置信息、方向信息和编码信息;
- (2) 在光照条件较好区域,使用单个摄像头,标记识别算法可以同时识别 4 个标记,准确度可达 100%,识别的处理速度为 50Hz,方向识别为 0~360°,误差区间为[-8°,8°].

Fig.9 Display of uMarker (ID=15,16) and recognition result on uTable<sup>[13]</sup>图 9 ID 为 15,16 的标记的实物图和识别效果图<sup>[13]</sup>

## 4 uMarker 引入的误识别和反复识别解决方案

### 4.1 误识别解决方案

即便 4 个摄像头中某个摄像头获取了完整的 uMarker 图像完成了识别,其他摄像头下也可能由于无法获取完整 uMarker 图像而无法完成识别,这样,Position Bar 和 Tag 将会被误识别为手指点。Position Bar 和 Tag 误识别的处理方法一致,唯一不同是对于 Tag,需要事先判断 Tag 是否在识别到的 uMarker 的图像内部。

对于 Position Bar 的误识别,算法如下:

- (1) 记录 uMarker 中位置信息,为 $(X_0, Y_0)$ 。
- (2) 遍历手指识别信息,如果对于元素 $(X, Y)$ 如果存在 $|X-X_0|<2 \text{ pixes} \ \& \ |Y-Y_0|<2 \text{ pixes}$ ,则认为是同一个点,也就是手指误识别的信息,记录数组下标  $i$ ,转(3);如果不满足,则转(2)。
- (3) 将  $i$  位置上的手指信息修改,设置 uMarker 标记位为识别到的 uMarker 的 ID,方向信息修改为 uMarker 方向信息,Session ID 保留不变,以便实时更新。
- (4) 信息修改完毕,进行反复识别的处理。

由于 uMarker 放上去的短时间内可能无法瞬间获取 uMarker 完整信息。所以,在 uMarker 放上去的短时间内,存在误识别的情况,这个情况暂时没有找到解决方案。

### 4.2 反复识别解决方案

因为 4 个摄像头同时工作,在本地信息融合,单个桌体上至少识别 1 个 uMarker 信息,最多识别 4 个 uMarker 信息,需要屏蔽这些多余的信息,仅仅保留 1 个 uMarker 信息。具体过程如下:

- (1) 本地信息融合负责接收 4 个识别系统识别到的触点、笔点、uMarker 信息。
- (2) 设置优先级,优先级 uMarker 信息>笔点信息>触点信息。
- (3) 如果接收到信息,则按照优先级来判断,优先级高的信息可以替换优先级低的信息;反之则不可以。

经过以上两步的处理,解决了标记的误识别和反复识别的问题,保证了 uMarker 识别的准确性。

## 5 结束语

本文为设计实现了拼接式交互桌面上的标记 uMarker 及其标记识别系统。标记是一种图形编码,为实物识别提供信息标识。标记设计受到特定的条件约束——最小识别尺寸、低精度的长度识别、交叠区面积的约束。uMarker 在 35mm×25mm 白纸上采用 3×3 二维点阵编码,拥有 28 个不同编码,方向范围是 0°~360°,精度区间为-8°~8°。与 reacTIVision 相比,uMarker 面积减小 75.7%,数量增多 16.7%。标记识别系统采用图像处理方式完成 uMarker 的识别,并通过历史信息预测方式识别信息不完整的 uMarker。识别性能保证单个摄像头下 4 个标记的同时识别,识别率达到 100%,处理速度 50Hz。标记识别系统解决了 uMarker 引入的误识别和反复识别。uMarker 可以提供实物的位置、方向和分类信息,扩展了桌面的实物交互能力。

### References:

- [1] Dietz P, Leigh D. DiamondTouch: A multi-user touch technology. In: Proc. of the UIST 2001. 219–226.
- [2] Morris MR, Huang AQ, Paepcke A, Winograd T. Cooperative gestures: Multi-User gestural interactions for co-located groupware. In: Proc. of the CHI 2006. 1201–1210.
- [3] Shi Y, Yu C, Shi YC. Finger gesture interaction on large tabletop for sharing digital documents among multiple users. In: Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Ubi-Media Computing (U-Media). 2008. 8–13.
- [4] Steve H, Marc L. An RFID-based infrastructure for automatically determining the position and orientation of game objects in tabletop games. In: Proc. of the Concepts and Technologies for Pervasive Games—A Reader for Pervasive Gaming Research, Vol.1. 2007. 311–336.
- [5] Jordà S, Geiger G, Alonso M, Kaltenbrunner M. The ReacTable: Exploring the synergy between live music performance and tabletop tangible interfaces. In: Proc. of the TEI 2007. 2007. 139–146.



- [6] Kaltenbrunner M, Bencina R. reacTIVision: A computer-vision framework for table-based tangible interaction. In: Proc. of the TEL 2007. 2007. 69–74.
- [7] Cao X, Wilson AD, Balakrishnan R, Hinckley K, Hudson SE. ShapeTouch: Leveraging contact shape on interactive surfaces. In: Proc. of the TABLETOP. 2008. 129–136.
- [8] Paul HD, Benjamin DE. SurfaceWare: Dynamic tagging for Microsoft surface. In: Proc. of the TEL 2009. 2009. 249–254.
- [9] Yan YX, Zhang XL. Research and analysis of the virtual reality with FLARToolKit. In: Proc. of the Electric Engineering and Computer (MEC). 2011. 1614–1617.
- [10] Bi X, Shi Y, Chen X. uPen: A smart pen-liked device for facilitating interaction on large displays. In: Proc. of the IEEE Int'l Workshop on Horizontal Interactive Human-Computer Systems (Tabletop). 2006. 160–166.
- [11] Bencina R, Kaltenbrunner M. The design and evolution of fiducials for the ReacTIVision system. In: Proc. of the 3rd Int'l Conf. on Generative Systems in the Electronic Ar5. 2005.
- [12] Kaltenbrunner M, Fabra UP, Spain B. reacTIVision and TUIO: A tangible tabletop toolkit. In: Proc. of the ITS 2009. 2009. 45–60.
- [13] Xu CJ, Shi YC, Suo Y. UI management system on multi-user interactive tabletop. Journal of Software, 2010,21:33–38 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/10004.htm>

#### 附中文参考文献:

- [13] 吴晨俊,史元春,索岳.面向多用户交互桌面的界面管理系统.软件学报,2010,21:33–38. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/10004.htm>



王运涛(1989—),男,山东潍坊人,博士生,主要研究领域为人机交互.



秦永强(1986—),男,博士生,主要研究领域为人机交互.



喻纯(1984—),男,博士生,主要研究领域为人机交互.



史元春(1967—),女,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为人机交互,普适计算,多媒体.