

一种面向交互桌面的用户界面模型*

刘佳升^{1,2+}, 张凤军¹, 任磊³, 戴国忠¹, 王宏安¹

¹(中国科学院 软件研究所 人机交互与智能信息处理实验室, 北京 100190)

²(中国科学院 研究生院, 北京 100190)

³(北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院, 北京 100191)

User Interface Model for Interactive Tabletops and Surfaces

LIU Jia-Sheng^{1,2+}, ZHANG Feng-Jun¹, REN Lei³, DAI Guo-Zhong¹, WANG Hong-An¹

¹(Intelligence Engineering Laboratory, Institute of Software, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

²(Graduate University, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

³(School of Automation Science and Electrical Engineering, BeiHang University, Beijing 100191, China)

+ Corresponding author: E-mail: xiaotu1248@163.com

Liu JS, Zhang FJ, Ren L, Dai GZ, Wang HA. User interface model for interactive tabletops and surfaces. Journal of Software, 2012, 23(Suppl. (2)): 115-128 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/12031.htm>

Abstract: Interactive tabletops and surfaces (ITS) are important components in computer supported co-located cooperation environments. ITS is different from the traditional WIMP interfaces and has the features of horizontal display, multiple input devices, and single display groupware. There is a lack of guidance in the development and design of ITS. A user interface model is proposed to solve the problem. First, a description method is proposed to describe multiple devices and the collaboration interaction, which adopts part of the methodology Penichet chose to analyze person-computer-person interaction and also proposes an additional task-devices table (TDT) to ease the description of the interaction of different devices in ITS. Next, the ITS user interface metaphor OCAL (Objects Containers Adorners Languages) is described. Based on the analysis, Puerta's general computational framework is specific into ITSUIM (Interactive Tabletops and Surfaces User Interface Model) under the guide of OCAL. Finally, an application example is given. Experimental results show that the method proposed here is capable of being efficient enough to support the design and development of the user interfaces of ITS.

Key words: human computer interaction; interactive tabletop; multi-touch; user interface model

摘要: 交互桌面是当前自然用户界面的研究热点,能够提高多用户协作环境的交互自然性,然而,因其具有水平视觉显示、多设备交互、单显示多用户协同等区别于传统 WIMP 界面的新特点,使得交互桌面的设计和开发仍缺少理论和方法指导.针对该问题提出一种面向交互桌面的用户界面模型并进行应用验证.首先,给出交互桌面多设备协作交互描述方法,该方法引入 Penichet 对协作任务的分析模型,并针对交互桌面多设备输入的特性,提出使用任务-多设备二维关系表 TDT 来描述任务与设备之间的关系;其次,提出界面隐喻 OCAL(objects containers adorners

* 基金项目: 国家自然科学基金(61173059, 61103096, 61135003); 国家高技术研究发展计划(863)(2009AA01Z337, 2012AA02A608); 国家重点基础研究发展计划(973)(2009CB320804)

收稿时间: 2012-05-20; 定稿时间: 2012-09-29

language);再次,在上述界面分析的基础上,提出界面模型 ITSUIM,该模型以隐喻 OCAL 为指导,对 Puerta 的通用界面模型进行了扩展;最后,给出了该方法的应用实例.应用实例及用户评估表明,该方法为交互桌面的设计提供了一种有效的解决方案.

关键词: 人机交互;交互桌面;多点触控;界面模型

当前,用户界面研究的焦点已经从传统 WIMP 界面转移到下一代用户界面——自然用户界面,如何实现多用户协作环境的自然交互是自然用户界面的研究热点之一,2011 年 ACM CHI 国际会议针对这一问题组织了专题研讨会,并提出了分布式用户界面(distributed user interface,简称 DUI)这一新的研究领域.同位协同是 DUI 群体协作的一种重要形式,例如会议室中的围桌讨论,而交互桌面(interactive tabletops and surfaces,简称 ITS)正是基于围桌协作的理念发展而来的新型用户界面.ITS 既可单独存在作为多用户面对面信息交流的媒介,也可作为 DUI 的控制中心集成到更复杂的计算机辅助协同环境中,在军事、教育、设计等领域有着广阔的应用前景.

交互桌面具有一系列区别于传统 WIMP 界面的特点,具体包括:

(1) 水平视觉显示.位于不同方位的用户相互之间不能共享视角,若采用传统 WIMP 范式将会给用户带来认知困难,因此,界面实体需要新的呈现方式;触点输入可能在用户不知情的情况下触发系统状态的变迁^[1],从而导致系统错误,让用户感觉无所适从,需要对用户的触点输入进行可视化反馈;领域对象可能会具有一些物理仿真属性^[2],如惯性、折皱等,以提高用户体验、增强用户的沉浸感,需要对这些仿真属性进行真实感呈现.

(2) 多设备交互.交互桌面支持多种输入设备的并行使用,具有丰富的表达能力.用户手指是最主要的输入方式,此外,某些情况下也会加入数字笔、语音等输入设备.这虽为用户的自然交互提供了便利,但给系统开发也带来了一系列问题,如交互设备的实时管理、扩展与灵活置换,交互设备与系统功能的对应关系等.

(3) 单显示多用户协同.交互桌面是一种单显示群件,在协同过程中,存在人-机、人-人、人-计算机-人之间的交流与合作,如何设计用户界面以有效支持多用户之间的协同,同时充分考虑单个用户对交互的个性化需求是交互桌面需要考虑的问题.

然而,目前交互桌面的设计仍缺少具体的理论和方法指导,ITS 设计人员多是凭借经验或直觉对界面进行设计.随着 ITS 应用的深入开展,交互桌面系统开发过程中存在的问题也日益显著.本文针对这一问题,基于上述特点提出了一种面向交互桌面的用户界面模型并进行了应用评估.首先,给出交互桌面系统多设备协作交互描述方法,该方法引入 Penichet 对协作任务的分析模型^[3],使用 OSD(organizational structure diagram)图表示用户与用户之间的关系,使用 CD(collaboration diagram)图表示用户与任务之间的关系,并针对交互桌面多设备输入的特性,提出使用任务-多设备二维关系表 TDT 来表示任务与设备之间的关系.其次,提出界面隐喻 OCAL,该隐喻汲取了 George 提出的自然用户界面通用隐喻 OCGM^{**}的设计思想,并对其扩展和演变以适应交互桌面的设计.再次,在上述界面分析的基础上,提出界面模型 ITSUIM,该模型以隐喻 OCAL 为指导,对 Puerta 的通用界面模型^[4]进行了扩展.最后,给出了本文方法的应用实例 cityplanning.应用实例及用户评估表明,本文提出的方法能够有效地指导交互桌面的界面设计.

1 相关工作

研究者针对交互桌面已经开展了大量研究.从交互输入角度出发:Wu^[5]提出使用更为自然的多指、全手手势与交互桌面进行交互,以便更好地利用交互桌面提供的交互带宽;Morris^[6]提出支持多触点输入的交互桌面,为多人合作手势的使用提供了便利条件,并对交互桌面下多用户合作手势的使用进行了研究;Weiss^[7]给交互桌面添加触觉反馈,将实物控件引入交互桌面系统;Tes^[8]将语音交互引入交互桌面系统.从交互输出角度出发:Wilson^[2]将交互桌面的多触点输入作为物理模拟引擎的输入,使用户在操作数字对象时就如同操作真实物体一般,数字对象具有惯性、碰撞反弹、摩擦受阻等行为.Ryall^[9]根据用户的不同,提出了 iDwidget 的概念,用差

** http://openexhibits.org/wp-content/uploads/papers/George_Blake_OCGM.pdf

别显示的方式适应不同用户的个性化需求;Wigdor^[1]提供了一种可视化方法 Ripples,对用户触点的正确输入或错误输入均给予可视化反馈。

交互桌面是理想的同位协同工作平台,Forlines 等人^[10,11]使用交互桌面控制多个垂直大屏幕的显示;Wigdor^[12]使用缩略图的方式利用交互桌面来控制辅助大屏幕的显示;Everitt^[13]使用交互桌面作为多个设备之间的数据传输中枢。

UML 是最常用的系统建模语言,传统 WIMP 界面可使用该语言的类图、对象图和包图表示系统的静态结构,活动图、时序图等表示系统的动态行为,但这些图并不能直观地表示 CSCW 系统中人-计算机-人这种交互模式,Penichet^[3]的协作系统分析模型使用 OSD 图和 CD 图表示群件用户的组织结构及用户与用户之间的协作交互,并对 CTT^[14]扩展来表示协作环境下任务与任务之间的关系,该研究为协作环境系统分析提供了强有力的工具,但对于交互桌面这种多设备环境,任务设备关系没有合适的表示方法,本文在 Penichet 工作的基础上,对其分析模型进行扩展,提出任务-多设备二维关系表,用以表示任务与设备之间的关系。

隐喻界面依赖于用户在界面视觉提示与功能之间建立的直觉联系,而不必了解软件的运行机制^[15]。目前广为使用的图形用户界面就是基于 WIMP 隐喻构建的。由于 WIMP 界面存在的诸多不足,Green 和 Jacob 等人提出了 Non-WIMP 思想,Non-WIMP 界面是指没有使用桌面隐喻的界面^[16]。Van Dam 在 Non-WIMP 的基础上提出 Post-WIMP 界面^[17],Post-WIMP 界面是指至少包含了一项不基于传统 2D 交互组件的交互技术的界面。George 针对自然用户界面,提出通用隐喻 OCGM(objects,containers,gestures and manipulations)^{***},其中,对象是基本的界面元素,可以是物理对象也可以是虚拟的界面元素;容器是对象以某种形式组织形成的集合;手势表示离散的、间接的、基于理解的交互;操作代表连续的、直接的、基于环境的交互。Beaudouin-Lafon 提出的 Post-WIMP 界面交互模型^[18],通过将各种交互技术抽象为交互工具(interaction instrument),解决了 Post-WIMP 界面交互技术多样性的问题。

界面模型已被广泛用于指导各种形式的界面设计。1999 年,Puerta^[4]提出了一个基于模型的通用计算框架;Tandler 于 2003 年提出了一个普适计算环境的概念模型^[19],较为强调在虚拟环境中多种异构设备的管理;目前也有针对多用户同位协作环境下界面模型的研究,Stewart^[20]提出一种多用户使用单个显示器进行同位协同的交互模式,主要论述了这种界面形式为系统开发带来的新的需求以及此类界面的优缺点。

2 面向交互桌面的用户界面模型

2.1 概述

针对交互桌面系统水平显示、多设备并存、多用户协作等特性给界面设计、开发带来困难的问题,本文从软件开发过程的角度出发,通过对需求分析及界面设计阶段提供相应的方法来指导交互桌面系统界面的开发,以此为基础,给出了交互桌面用户界面的形式化描述,即定义了交互桌面用户界面模型 ITSUIM。

如图 1 所示,在系统需求分析阶段,本文使用 OSD 描述用户群组结构分析结果;使用 CD 描述协作任务分析结果;使用 TDT 描述所有交互设备的分析结果。这些图表可以作为对传统系统建模方法,如 UML 的补充,以可视化的方式从不同的角度刻画系统,一方面可帮助系统设计人员更为深入、全面地理解系统,另一方面可作为系统涉众相互之间交流的媒介。在交互设计阶段,界面隐喻 OCAL 为交互输入和交互输出设计提供了基本思想和设计框架,设计人员可从 OCAL 出发结合具体的应用领域设计用户界面。

基于上述分析与设计,本文定义了交互桌面界面模型 ITSUIM,针对交互桌面的特性,本界面模型对 Puerta 的通用界面模型^[4]进行了扩展,对于用户模型,本文定义了角色模型来表示协作用户在群组中的角色,在用户基本信息中包含了用户的体型特征等,以方便自然手势等交互技术的设计;对任务模型的扩展体现在,在传统的任务模型基础上添加了用户角色信息,这一扩展有利于表示与特定角色相关的任务,根据参与任务的角色的不同,

*** http://openexhibits.org/wp-content/uploads/papers/George_Blake_OCGM.pdf

系统可给出不同的反馈;根据界面隐喻 OCAL,对于表征模型,定义了对象模型、容器模型、装饰模型等,使用对象、容器、装饰等作为界面的组成元素;对于对话模型,定义了交互设备模型,并从交互原语、组合同、习惯用法这 3 个层次来描述交互设备的交互能力。

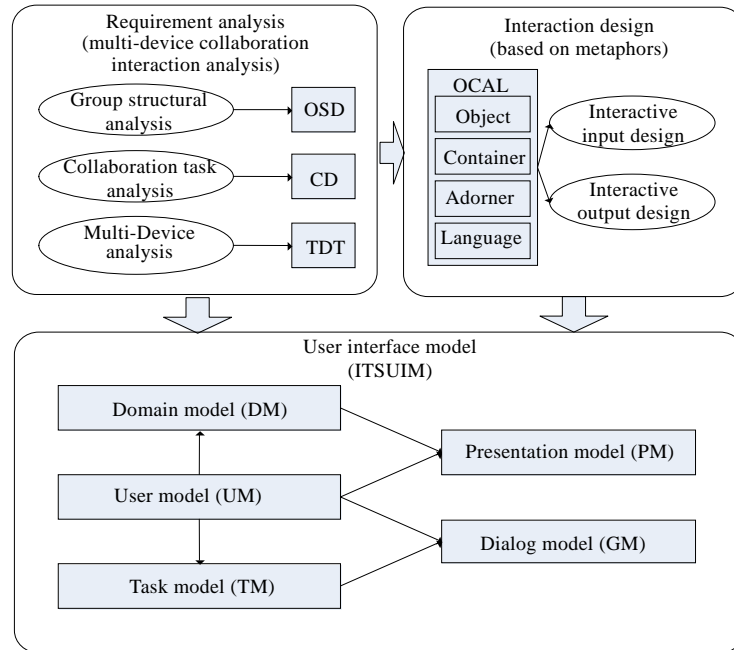


Fig.1 ITSUIM

图 1 面向交互桌面的用户界面模型

2.2 交互桌面的多设备协作交互描述方法

界面分析是界面建模的基础,旨在解决目标系统是什么的问题,为系统设计开发人员提供依据.Penichet 弥补了传统分析模型对协作系统用户与用户之间交互分析的不足,提出了新的模型和图标表示来描述系统参与者之间的协作以及人-计算机-人之间的交互、参与者的组织结构以及他们扮演的角色。

交互桌面是同时同地协作系统,在协作用户组织结构分析、协作任务分析等方面均可借鉴 Penichet 的工作,在此不再详述.本文与 Penichet 工作的区别为如下两点:其一, Penichet 提出的 CD 图适用范围较广,将其直接应用于交互桌面会产生大量冗余信息,本文对其 CD 图进行了简化;其二,交互桌面是多设备环境,这给系统的实现带来了很大困难,现有分析模型尚未考虑交互设备,本文提出了新的模型和图标表示来描述交互设备以及任务与设备之间的关联关系。

Penichet 的协作图交互图标如图 2 所示,其中,or 为 coordination,mm 为 communication,op/la 为 cooperation/collaboration,S/A 为 synchronous/asynchronous,D/S 为 different/same place.对于交互桌面,是同时同地协作系统,即 S/A 的取值恒为 S,D/S 的取值恒为 S,CD 图中这两项的存在会造成大量的冗余信息,本文在 Penichet 的协作交互图的基础上去掉了 S/A 和 D/S,简化后的 CD 图标如图 3 所示。

在交互桌面环境下,用户可以使用多指手势作为输入,也可使用数字笔、Mark、实物、鼠标等进行输入,同一任务可以由多种输入方式来实现.对于这样一个多种交互设备共存的交互环境,充分理解各种交互设备的特点非常重要,在界面设计过程中,有利于根据用户习惯及交互上下文选择适当的交互设备和技术以及确定交互技术的组合方式。

Beaudouin-Lafon 定义了一系列属性来描述、比较不同的交互设备,这些属性包括间接性(degree of indirection)、一致性(degree of integration)、相容性(degree of compatibility)^[18].其中,间接性是指交互设备在操

作的时空偏移量,空间偏移量是指交互设备实际操作的地方与被操作对象的空间距离,时间偏移量是指交互设备实际操作的时间与被操作对象做出反馈的时间差;一致性是指被操作对象可操作的自由度与交互设备提供的自由度的比值;相容性是指用户使用交互设备所产生的物理动作与被操作对象产生反馈的相容性.Beaudouin-Lafon 从人机工效学的角度描述了交互设备,为交互设备的可用性评估提供了一定的依据,但缺少对设备产生的交互信息的描述.本文在其工作的基础上,从交互接口的角度定义了交互设备的另外 3 个属性:原语、组合词、习惯用法.其中,原语定义了交互设备可产生的基本交互信息;组合词由基本交互信息组合而成,通过一个或多个原语组合创建,定义了所有这些组合的全集;习惯用法与具体领域相关,由组合词组合而成.

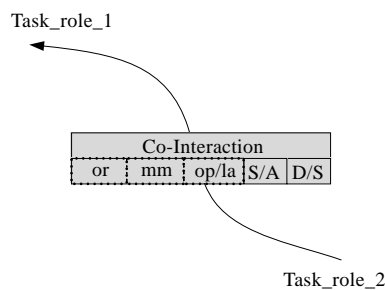


Fig.2 Original co-interaction diagram
图 2 原始 CD 图标

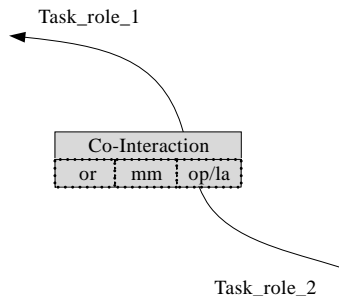


Fig.3 Simplified co-interaction diagram
图 3 简化后的 CD 图标

任务设备二维关系表 TDT(task device table)建模了系统中交互设备与交互任务的对应关系,描述了某一任务可以由哪些设备的哪些交互信息来触发完成.其中,表头的行包含了系统可用的所有交互设备,表头的列包含了用户需执行的所有交互任务,表格中的每一行表示某一交互任务可由哪些交互设备的交互信息完成.在任务与设备分析的基础上,设计人员可根据用户习惯、交互任务及现有设备的特点,选择最为自然的设备交互信息来构建 TDT,开发人员则可对照该表实现交互输入对应的系统命令,测试评估人员可对照该表测试评估该系统.

2.3 交互桌面的界面隐喻OCAL

针对交互桌面的界面特征,本文提出了 OCAL 隐喻.OCA,L 分别与 OCGM 隐喻中的 OC,GM 相对应.在 OCAL 隐喻中,界面的基本元素仍是对象(object),对象既包括领域模型在界面上的可视化表示,还包括对领域模型产生影响的工具,对象可从外形、行为、状态变迁等多个方面进行可视化表示;相关对象集仍是置于同一容器中,容器(container)可对其中对象作统一处理,如变形、拖拽,容器也可根据其要表达的语义具有多种表现形式,如不同的容器类型,不同的对象排列方式;场景由容器的嵌套组成,内层容器可置于外层容器中.此外,可在容器表层添加装饰层(adorner),装饰层用于给容器添加特定的视觉效果,装饰层的作用范围可仅用于内层容器,也可用于外层容器,可根据需要给容器添加多层装饰,如图 4 所示.人机交互、人人交互、人-计算机-人交互使用的媒介可统一理解为语言(language),彼此之间的交互均可理解为对话,人人交互使用的眼神、肢体等均可理解为语言,人机交互之间使用交互设备进行交互,也可以理解为语言,可借用语言中的概念原语、组合词、习惯用法来描述交互设备,如图 5 所示.原语的多少决定了学习设备所用的时间和难度,同时也决定了设备的表达能力和灵活度.原语的多少可作为交互设备设计和可用性评估的依据.

OCAL 隐喻并没有在各个方面完全替代 OCGM 隐喻,它保留了界面的基本元素 Object 和 Container,并根据交互桌面的特征引入 Adorner,这一改进将界面功能部分与界面特效部分相分离,界面的表意更为丰富,界面设计人员可以此为启示,更为直观地设计用户界面显示.使用 L 替代 GM,可以囊括同位协作环境下的各种交互,包括人与机之间使用交互设备的交互以及人与人之间语言上的交流和手势、眼神上的交流.

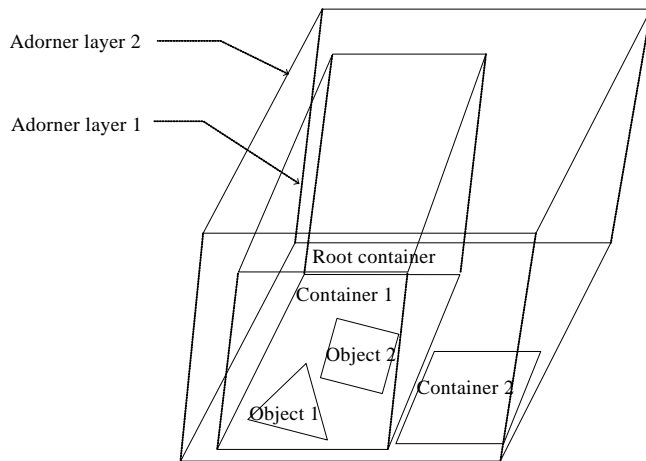


Fig.4 The illustration of OCA diagram

图4 OCA 隐喻示意图

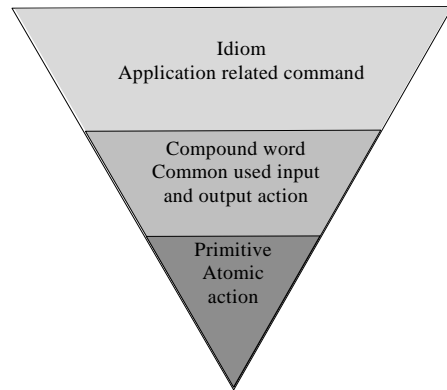


Fig.5 The illustration of interactive vocabulary

图5 交互词汇组成要素的层次结构示意图

2.4 交互桌面的界面模型ITSUIM

完整的交互桌面界面模型,应该具有如下功能:能够描述交互桌面用户小组特性、用户特征及用户角色等;能够描述具有物理仿真特性的领域对象及其相互之间的关系;能够描述协作任务本身及任务之间的时序关系和层次关系;能够描述用户通过用户界面获取到的界面对象及其属性信息;能够描述各种交互设备;能够描述用户使用交互设备与界面对象交互完成协作任务的过程.本文以 OCAL 隐喻为基本设计思想,依照 Puerta 通用界面模型的组成元素,定义了面向交互桌面的界面模型 ITSUIM.

形式上,ITSUIM=(UM,DM,PM,TM,GM),每个元素描述了交互桌面用户界面的一个侧面.其中,UM 用于对交互桌面中的用户进行描述,包括单个用户和群组组织的建模;DM 用于对交互桌面中的领域对象进行描述;PM 用于对交互桌面的可视化表征进行描述,定义了领域对象及界面组件的图形化表示方式;TM 用于对交互桌面的任务进行描述,包括任务的逻辑层次关系及协作制约关系;GM 用于对用户与交互桌面之间的交互过程进行抽象建模,针对交互桌面的多设备交互方式进行描述,能够有效地支持以多指手势交互为主体的多种交互方式共存的交互方式.

2.4.1 用户模型

用户模型是对特定应用领域中用户分析的结果.对于交互桌面这一同位协同环境,用户建模包括对用户团队组织的建模和用户个体特征的建模.角色模型可以用来描述用户团队组织,角色模型是指以团队内各角色在工作流中的职责为基础,通过角色的分析描述个体作为团队成员在团队中所处的位置、应发挥的作用、应承担的责任以及应产出的工作效果.用户的基本信息,包括用户的个人信息,如用户的姓名、年龄、职业;用户对交互方式的偏好,如习惯于用左手或者右手、喜欢用笔交互或者用手指进行交互、喜欢用手势完成某任务或者通过界面控件完成同样的任务等;用户对各种交互技术的使用背景及熟练程度,如常用的交互技术是什么,是否使用过触摸屏,是否使用过数字笔等.

定义 1(角色模型(role model,简称 RM)). $RM=(RoleID,Abilities,Responsibilities,Permissions)$.其中,RoleID 为角色编号;Abilities 为角色应具有的能力;Responsibilities 为角色应承担的责任,在系统交互过程中应完成的任务;Permissions 为该角色所具有的权限.

定义 2(用户基本信息 BasicInfo). $BasicInfo=(Name,Age,Feature,Habit,Background)$.其中,Name 为用户姓名;Age 为用户年龄;Feature 为用户体型特征信息;Habit 为用户的个人习惯偏好;Background 为用户的文化背景及交互技术使用背景.

定义 3(用户模型(user modal,简称 UM)). $UM=(UserID,RoleID,BasicInfo)$.其中,UserID 为用户唯一标

识;RoleID 为用户担当的角色;BasicInfo 为用户的基本信息.

领域模型

领域模型描述了用户通过用户界面浏览、访问、操作的对象,与应用的数据模型非常类似,但更为明确地表示了对象的属性和各种域对象相互之间的关系.领域模型由领域对象集和领域对象关系集组成.

定义 4(领域对象(domain object,简称 DO)). $\text{DomainObject}=\langle \text{DOID}, \text{Attribute1}, \text{Attribute2}, \dots, \text{Attributen} \rangle$.其中,DOID 为领域对象标识,Attribute i 为数据属性.

定义 5(领域对象关系(domain object relation,简称 DOR)). $\text{DomainObjectRelation}=\langle \text{DOID1}, \text{DOID2}, \text{Attribute1}, \text{Attribute2}, \dots, \text{Attributen} \rangle$.其中,DOID1 与 DOID2 表示关联的两个对象,Attribute i 为关系属性.

定义 6(领域模型(domain modal,简称 DM)). $\text{DM}=\langle \text{DOSet}, \text{DORSet} \rangle$.其中,DOSet 为领域对象集,DORSet 为领域对象关系集.

2.4.2 表征模型

表征模型描述了用户界面提供给用户的感官表示.以 OCAL 隐喻为基本设计思想,表征模型可由容器及装饰层两大部分组成.其中,容器包含了用户界面中待操作的对象图形、对象关系图形及用来操作对象工具的图形工具(图形控件)、实物代理(实物控件在界面中的图形部分);装饰层用于向用户提供其余的可视化需求,如手指触点的可视化反馈.此外,对 ITS 而言,为增强用户体验,某些情景下表征对象还会具有物理仿真属性,因此,本文构建了简化的刚体运动模型.

定义 7(刚体 RigidBody). $\text{RigidBody}=\langle \text{Mass}, \text{Inertia}, \text{Friction}, \text{MaxStaticFriction}, \text{Barycenter}, \text{LinearV}, \text{AngularV}, \text{Force}, \text{Torque} \rangle$.其中,Mass 是质量;Inertia 是转动惯量;Friction 是摩擦系数;MaxStaticFriction 是最大静摩擦力;Barycenter 是质心;Force 是受力;Torque 是力矩.具有物理运动属性的对象需具有 RigidBody 属性.

定义 8(对象图形(ObjectPresentation,简称 OP)). $\text{OP}=\langle \text{OPID}, \text{Visual}, \text{Size}, \text{Location}, \text{Orientation}, \text{Behaviors}, \text{IsRigidBody}, \text{RigidBody} \rangle$.其中,OPID 为对象图形的标记;Visual 为该对象的界面图形;Size 为该对象界面图形的尺寸;Location 为该对象界面图形的布局位置;Orientation 为该对象界面图形的布局方位;Behavior 为对象具有的动态显示属性,如撕裂行为;IsRigidBody 为领域对象是否为刚体的标记;RigidBody 为刚体属性值.

定义 9(对象关系图形(ObjectRelationPresentation,简称 ORP)). $\text{ORP}=\langle \text{ORPID}, \text{OPID1}, \text{OPID2}, \text{Visual}, \text{Size}, \text{Location}, \text{Orientation} \rangle$.其中,OPID1 与 OPID2 为该图形关联的两个对象.

定义 10(图形工具(GraphArtifact,简称 GA)). $\text{GA}=\langle \text{GAID}, \text{Visual}, \text{Size}, \text{Location}, \text{Orientation}, \text{Behavior}, \text{IsShareable}, \text{GestureEventSet}, \text{ManipulationEventSet}, \text{IsRigidBody}, \text{RigidBody} \rangle$.其中,Behavior 为图形工具具有的动态显示属性;IsShareable 为图形工具是否可供多人共享的标记;GestureEventSet 为图形工具监听的所有手势事件;ManipulationEventSet 为图形工具监听的所有操作事件.

定义 11(实物代理(TangibleProxy,简称 TP)). $\text{TP}=\langle \text{TPID}, \text{Visual}, \text{Size}, \text{Location}, \text{Orientation}, \text{CommandSet}, \text{IsRigidBody}, \text{RigidBody} \rangle$.其中,TPID 为实物代理的标记;CommandSet 为该实物代理所对应的实物可发出的所有命令,如实物旋钮发出的旋转命令^[7].

定义 12(容器 Container). $\text{Container}=\langle \text{CID}, \text{OPSET}, \text{ORPSET}, \text{GASET}, \text{ParentCID}, \text{ChildrenCIDSET}, \text{Layout}, \text{Visual}, \text{Size}, \text{Location}, \text{Orientation}, \text{IsRigidBody}, \text{RigidBody} \rangle$.其中,CID 为容器标记;OPSET 为容器内对象图形集;ORPSET 为容器内对象关系图形集;GASET 为图形工具集;ParentCID 为外层容器标记;ChildrenCIDSET 为内层容器标记集;Layout 为容器内对象布局.

定义 13(装饰 Adorner). $\text{Adorner}=\langle \text{AID}, \text{Visual}, \text{Size}, \text{Location}, \text{Orientation}, \text{Enabled}, \text{IsRigidBody}, \text{RigidBody} \rangle$.其中,AID 为该装饰的标记;Visual 为该装饰的可视化表示;Enabled 标记该装饰当前是否可用.

定义 14(装饰层 AdornerLayer). $\text{AdornerLayer}=\langle \text{ALID}, \text{AdornerSet}, \text{CID}, \text{Enable}, \text{Visual}, \text{Size}, \text{Location}, \text{Orientation}, \text{IsRigidBody}, \text{RigidBody} \rangle$.其中,ALID 为装饰层的标记;AdornerSet 为该装饰层包含的装饰集;CID 为该装饰层作用于的最外层容器;Enable 标记该容器当前是否可用.

定义 15(表征模型(PresentationModal,简称 PM)). $\text{PM}=\langle \text{CID}, \text{AdornerLayerSet} \rangle$.其中,CID 为最外层容

器;AdornerLayerSet 为所有的装饰层.

2.4.3 任务模型

任务模型逻辑上描述了特定领域内用户为了实现目标所要执行的交互活动的集合.

定义 16(任务模型 (task modal, 简称 TM)). $TM=(TaskID, Name, Type, GraphicObjectSet, ActionSet, ConditionSet, ParentTask, IsComposite, ChildTaskSet, RoleIDSet)$. 其中, TaskID 为任务的唯一标识;Name 为任务名称;Type 为任务类型, $Type=\{abstract, user, application, interaction\}^{[3]}$;GraphicObjectSet 为该任务相关的界面图形对象, $GraphicObject=\{OP, ORP, GA, TP, Container, Adorner, AdornerLayer\}$;ActionSet 为该任务对界面对象执行的操作;ConditionSet 为该任务执行所需的前提条件;ParentTask 为该任务节点的父节点;IsComposite 用来标记该任务是否为复合任务;ChildTaskSet 为该任务节点的子节点集合;RoleIDSet 用来标记与该任务相关的角色编号集.

2.4.4 对话模型

对话模型定义了用户通过交互设备与界面表征对象之间的交互,表示用户动作及动作产生的反馈.对话模型包含界面图形对象集、交互设备集及系统命令集.其中,界面图形对象集为与该对话过程相关的界面表征对象;交互设备集为用户在交互过程中使用的交互设备;系统命令集为用户动作触发的系统反馈.其中,用户与表征对象交流媒介交互设备的表达能力与用户体验直接相关,本文以 OCAL 隐喻为指导,使用原语、组合词、习惯用法来定义交互设备的交互特性.

定义 17(交互设备 Device). $Device=(DeviceID, PrimitiveSet, CompoundWordSet, IdiornSet)$. 其中,PrimitiveSet 定义了构成语言的所有原子元素;CompoundWordSet 定义了原语构成的所有组合用法,组合用法具有更复杂的结构,通过一个或多个原语组合创建;IdiornSet 定义了系统支持的所有习惯用法,习惯用法与具体领域相关,由组合词组合而成.通过这 3 个层次的描述可完整地定义交互设备与系统的接口,同时还可方便地添加新的组合用法和习惯用法以扩展该交互设备的表达能力.

定义 18(对话模型 dialogue model, 简称 GM). $GM=(GraphicObjectSet, DeviceSet, CommandSet)$. 其中,GraphicObjectSet 为与该对话相关的图形对象集合;DeviceSet 为用户在此次对话过程中使用的设备集合;CommandSet 为此次对话所有参与交互的用户触发的所有命令.

2.4.5 模型分析

基于 OCAL 隐喻构建的 ITSUIM 符合交互桌面用户界面的交互特征.首先,从信息呈现方式上看,ITSUIM 基于 OCAL 隐喻,表征子模型中定义了 3 种基本对象:对象、容器、装饰,是日常生活中人们围坐在桌子旁边完成协作任务时接触物品的抽象和概括.从认知心理学的角度考虑,人的认知能力主要受制于两个因素:在处理过程中可得到的资源以及可得到的数据的质量^[21].该模型利用了用户多年来已习得并熟练掌握的知识和技能,提高了处理过程中资源的质量,缩短了用户掌握界面的时间,从而减轻了用户的认知负担.此外,这种呈现方式有利于多用户同位协作,其一:对象、容器、装饰均具有旋转特性,用户可以根据自己的习惯调整这些对象的显示角度,直到方便交互为止;其二:多用户同位协作过程中,习惯于分区操作将界面空间划分为公共区、私人区、存储区^[22],以对象、容器等为界面基本对象,可方便地基于容器对界面对象进行划分,符合用户的行为习惯.其次,从交互方式上看,以语言为隐喻并借用语言中的概念构建对话模型可解决交互桌面如下一些问题.(1) 多输入设备的支持.采用设备模型与命令集相分离的定义方式,命令集仅与上下文相关联,交互动作对命令集是透明的,该方式为用户输入提供了更大的可扩展性.此外,原语的定义有利于不同通道交互信息的整合与利用.(2) 多用户并发交互的支持.任务模型是根据应用领域的业务需求定义的,并没有限制事件源,这为交互设备输入提供了透明接口,用户可根据任务与任务之间的并发、偏序关系进行并发交互.(3) 改善了用户交互体验,减轻了用户交互负担.该模型没有指定具体的交互设备及交互方式,用户可根据其自身的不同交互习惯选择适合的交互方式,减少了用户的训练时间,提高了操作效率.

由上述分析可见,该模型对用户交互所需的预备知识较少,用户可以快速掌握界面的使用,认知负担小;从界面显示和交互输入两方面考虑均支持多用户同位协同的工作方式;支持多设备的使用及用户个性化交互.

3 应用实例及评估

3.1 应用实例

本文以简化的城市规划原型系统 CityPlanning 为例说明 ITSUIM 建模方法.CityPlanning 的主要用途是供方案设计人员和方案评审人员讨论规划方案,也可给外来参观人员展示方案.系统使用的简要流程为,设计人员代表给评审人员演示设计方案,演示过程中评审人员对方案提出异议,设计人员与评审人员共同探讨设计方案,设计人员修改现有设计方案,设计人员与评审人员共同浏览新的方案,此过程不断迭代,直至生成满意的设计方案为止,内部人员给外来参观人员浏览规划方案.具体实现过程如下:

(1) 对 CityPlanning 多设备协作交互进行分析描述

第 1 步分析系统用户角色,确定系统用户的群组特性和每一个角色用户的交互习惯.CityPlanning 的用户包括设计人员、评审人员及参观人员,对应 3 种角色设计者、评审者和参观者.设计人员和评审人员均属于内部人员,参观人员属于外部人员,他们均属于 ITS 用户.根据职责的不同,设计人员可进一步划分为设计人员和设计人员代表.同理,评审人员可划分为评审人员和评审人员代表,使用 OSD 图描述,如图 6 所示.其中,“G”图标表示协作小组,“R”图标表示用户角色,“U”图标表示具体的用户;虚线箭头表示角色扮演关系,菱形箭头表示部分与整体之间的聚合关系,实线空心三角形箭头表示组织中的等级关系.对于各图标的含义详见文献[3].对角色用户的交互习惯也逐一进行记录,如设计团队中的设计人员 A 习惯使用手写输入进行文本输入,设计人员 B 习惯使用物理键盘进行文本输入.

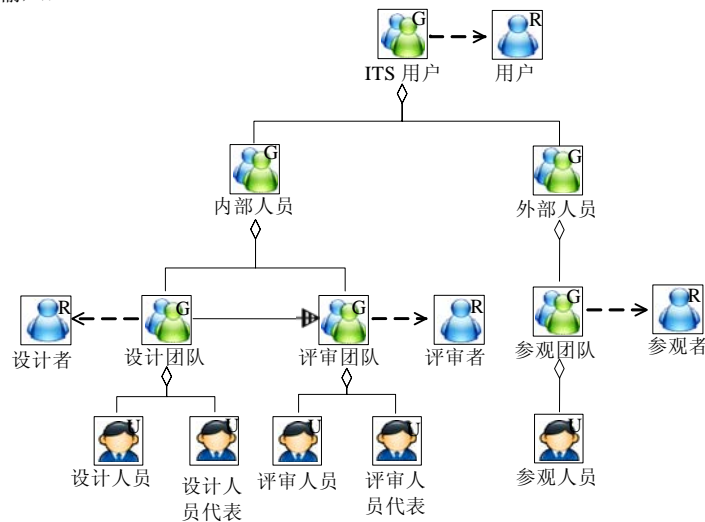


Fig.6 Organizational structure diagram for CityPlanning

图 6 CityPlanning 的 OSD 图

第 2 步分析系统任务,尤其是用户与用户在完成协作任务时的合作关系,并绘制 CD 图来描述用户与用户的协作关系,如 CityPlanning 设计团队的协作任务包括合作设计(每一位设计人员负责设计不同的内容,如设计人员 A 负责高程设计、设计人员 B 负责人口密度设计)、协作(设计人员 A 将设计器调整为方便设计人员 B 使用的角度)、设计人员 A 和设计人员 B 就设计方案进行讨论等, CityPlanning 的整体 CD 图如图 7 所示.

第 3 步分析交互设备,确定每一设备的交互能力,按照设备描述模板描述设备.对于 CityPlanning 目前使用的输入手段主要是多指手势输入,同时还支持鼠标输入,对多指手势的描述可见表 1.

第 4 步分析交互方式与系统任务的对应关系,参照用户习惯,确定每一系统任务的交互方式,填写任务设备二维表.以 CityPlanning 中的部分交互任务为例,给出了一个示意表,见表 2.多指手势为系统的主要交互设备,所有交互任务均可由多指手势实现;鼠标为系统的辅助交互设备,仅能完成部分交互任务;某一任务可使用交互设备的哪些命令实现均可从表中查找.

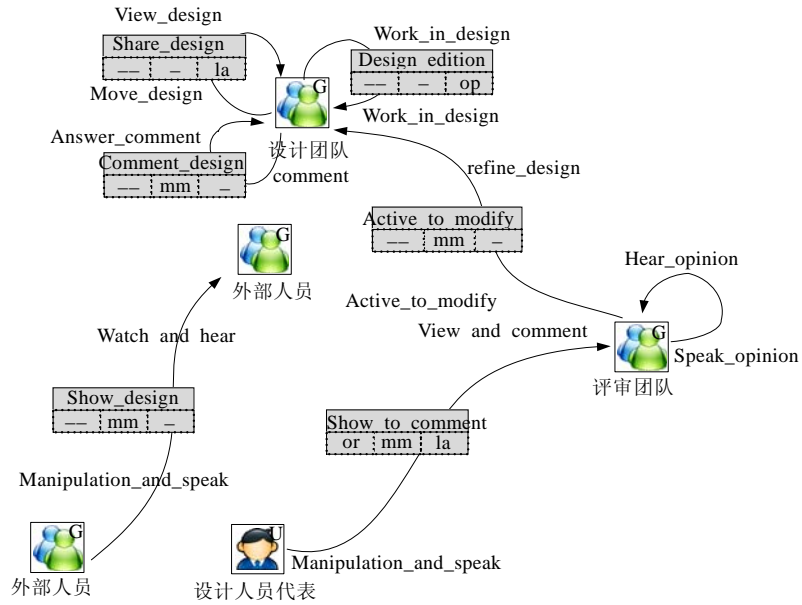


Fig.7 Co-Interaction diagram for CityPlanning

图 7 CityPlanning 的 CD 图

Table 1 Multi-Fingers gestures description

表 1 多指手势描述

Device-1	Multi-Finger gesture
Version	v1.0(2012.3.10)
Author	***
Source	Internal research
Description	User fingers are input device
Degree of indirection	0,0
Degree of integration	3/2
Degree of compatibility	High
Primitive	Finger_down, Finger_move, Finger_up Tap, DoubleTap, Hold, Scale, Rotate, Move
Compound word	
Idiom	Related to specific application, for example check gesture means conform the city model to be edit
Remark	None

Table 2 Task-Devices table of CityPlanning

表 2 CityPlanning 任务-多设备二维关系表

Device	Task	
	Multi-Finger gesture	Mouse
Move_design	Move	Move
Open_design_toolbox	'Check' Gesture	
Close_design_toolbox	'X' Gesture	Click
...		

(2) 以界面隐喻 OCAL 为基本设计思想,设计界面呈现方式及交互方式

以 CityPlanning 为例,该应用的主要任务是通过协同设计实现城市规划,可视化界面的根容器为整体待规划区域,被操作的对象为楼房、街道等,人口密度的示意图可放在子容器中进行编辑,用户可用手势语言与系统进行交互,用户与用户之间可用语言和肢体语言进行交流.设计过程中,可以具体领域为背景设计容器和对象,交互设备原语应尽可能地少,以提高交互技术的易学、易用性.

(3) 使用 ITSUIM 对界面进行描述

第 1 步构建用户模型 UM.根据 OSD 图中的角色构建角色模型 RM,根据需求获取用户的基本信息 BasicInfo,进而构建界面用户模型 UM. $RM=(r0,(area\ design,road\ design,...),(area\ design,road\ design,...),modify)$,其中,r0 为角色编号,(area design,road design,...)为角色具有区域设计、道路设计等能力,(area design,road design,...)为角色具有区域、道路设计等职责,modify 为角色具有修改城市模型的权限. $UM=(Designer\ A,26,(1.62m,52kg,59cm,12.5cm,31^\circ),(hand\ writing,...),(MS,use\ touch\ screen\ freely,...),r0)$,其中,Designer A 为用户姓名;26 为用户年龄;(1.62m,52kg,59cm,12.5cm,31°)为用户体型特征,这些数字分别代表身高、体重、手臂长、同手两指尖最大距、手自然放置时大拇指与食指指尖的夹角;(hand writing,...)表示用户有使用手写输入等偏好;(MS,freely,...)表示用户的背景具有硕士学历,对触摸屏很熟悉;r0 表示用户属于该编号的角色.

第 2 步根据需求获取具体领域的业务数据.领域建模方式与传统的领域建模相似,即对领域中的实体及实体间的相互关系进行分析建模.

第 3 步根据系统任务分析结果构建任务模型.系统任务与任务之间的时序关系,在任务模型中使用 ConditionSet 表示;任务与任务之间的层次关系,使用 ParentTask,IsComposite 和 ChildTaskSet 表示;与该任务相关的角色使用 RoleIDSet 表示;该任务将影响到的界面对象使用 GraphicObjectSet 表示;此外,提供任务的基本信息 TaskID,Name,Type. $TM=(t0,area\ edit,user,area\ model,(select\ area\ type,select\ goal\ area,edit\ goal\ area,save\ edit),area\ edit\ container\ opened,t1,is,(operate\ on\ area\ type\ container,operate\ on\ area\ model),r0)$,其中,t0 为任务编号;area edit 为任务名称;user 为任务类型;area model 为被操作的图形对象;(select area type,select goal area,edit goal area,save edit)为该任务的动作集,首先选取区域类型,然后将区域模型定位到待编辑的目标区域,编辑目标区域,保存修改;area edit container opened 为该任务的前提条件,区域编辑容器处于打开状态;t1 为父任务的编号,这里的父任务为编辑城市模型;is 表示该任务是复合任务;(operate on area type container,operate on area model)表示该任务的两个子任务;r0 表示该任务由具有角色 r0 的用户完成.

第 4 步构建表征模型 PM.表征模型是对上述基于 OCAL 界面隐喻设计的界面的形式化描述,将设计产生的容器树、对象树和装饰层转化为 PM 模型参数即可.CityPlanning 的根容器用来放置 city model;根容器中又放置了 4 个子容器,分别放置 area model,build model,height model,rode model;根容器中有两个图形工具:系统控制工具条和模型选择工具;根容器有一个装饰层,该装饰层用于给出触点信息的可视化反馈.子容器还可以进一步细化,在此不再赘述.

第 5 步构建对话模型.将交互设备分析结果设备描述模板形式化表示为设备模型 Device, $Device=(d0,(finger\ down,finger\ move,finger\ up),(rotate,translate,scal,e,...),(check,...))$,其中,d0 为设备编号;(finger down,finger move,finger up)为该设备的交互原语,对应于手指与触屏交互的 3 个状态;(rotate,translate,scal,e,...)为该设备的组合用法,代表旋转、移动、旋转等多指手势;(check,...)为该设备的习惯用法,使用 check 表示选中.根据用户模型和任务模型建立对话模型,以用户为中心任务驱动为原则,根据任务模型中与某任务相关的 GraphicObjectSet,ActionSet,RoleIDSet 以及用户模型中的 BasicInfo 构建对话模型,为用户选取最符合其行为习惯的交互设备及交互技术. $GM=(area\ edit\ container,user\ fingers,move)$,表示用户使用手指移动区域编辑容器.

(4) 基于界面开发工具的界面实现

基于 ITSUIM 设计开发了面向组件的交互桌面界面开发工具 MTBuilder^[23],该工具内置了丰富的多指手势识别器,提供了一组适用于交互桌面的可旋转界面组件库,此外还提供了对用户并发输入的事件管理机制.在这个平台工具基础之上,交互桌面设计人员可以很方便地创建交互桌面系统用户界面.图 8 为 CityPlanning 的 4 位

用户使用该系统对城市模型进行协同设计的系统界面。

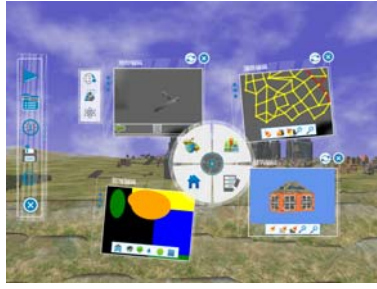


Fig.8 Cityplanning

图 8 城市规划系统

实例表明:本文方法能够有效描述多用户同位协同,如实例的 CD 图描述了系统用户设计团队、评审团队、参观团队相互之间的协同合作;能够描述多设备交互,如实例的 TDT 表描述了系统多设备共存情况下设备命令与系统任务的对应关系;实例界面场景与操作均与物理桌面上的操作相类似,城市模型所在根容器可理解为物理桌面,各个子模型所在容器可理解为纸张,图形工具可理解为物理工具箱,用户可使用双手像操作真实物体一样操作这些界面对象,交互方式自然直接.因此,基于这些分析设计结果的 ITSUIM 界面模型能够体现交互桌面用户界面特点,能够有效描述交互桌面用户界面.

3.2 用户评估

为了检验系统的可用性,我们随机邀请了 8 名大学生作为被试者使用世博园导游系统并进行评估,所有被试者在此之前均没有使用交互桌面的经验.实验过程中,每名用户均需要完成一系列相同的交互任务:1) 使用路径查询从当前位置到达世博园的某个场馆;2) 规划场馆浏览路径;3) 查看某个场馆的网页介绍、视频解说;4) 查看距离当前场馆最近的某个公共设施.我们先为参与实验人员做了一次演示,然后所有参与者逐一完成上述交互任务.本文实验使用的多点触摸交互桌面基于 LLP 技术,交互桌面规格为:长(140cm)×宽(104cm)×高(90cm),摄像机的分辨率是 640×480.在每位用户实验完成之后,立即以调查问卷的形式让该用户对系统的用户体验进行主观评分,评价维度包括愉悦度、舒适度、易学性、易用性、交互自然性、交互直观性等几个方面,每一维从很差到很好分为 10 个等级,调查问卷的统计结果如图 9 所示.从图 9 中可以看出,从整体上来讲,用户对我们的系统给予了肯定,尤其是在交互直观性、交互自然性和愉悦度这 3 个方面,用户均给出了很高的评价,说明多触点交互方式较为满足人们的行为方式,确实是一种直观、自然的交互方式,在易学性和易用性方面也得到了用户的认可,说明这种交互方式符合人们的日常行为习惯和认知,易于被用户理解.然而,在舒适度方面得分较低,经采访用户得知,之所以感觉不舒适是由于在操作的过程中一直需要手指在屏幕上滑动、游走,时间稍长就感觉手指头磨得不舒服,对于这一问题我们后续可以考虑采取一些措施来改善用户体验.

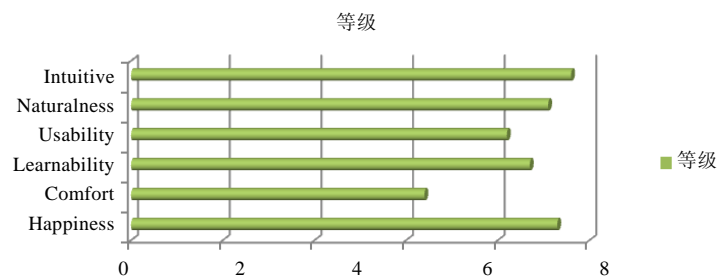


Fig.9 Degree of satisfaction

图 9 用户满意度评级

4 结束语

本文针对交互桌面设计缺少理论和方法指导的问题,提出了一种面向交互桌面的用户界面模型.首先,设计了一种交互桌面系统多设备协作交互描述方法;然后,提出了适合交互桌面的界面隐喻 OCAL;并在此基础上建立了支持交互桌面描述的界面形式化模型.最后,将本文提出的模型和方法应用于一个城市规划原型系统的交互桌面设计实例中,并进行了用户评估分析.应用实例及用户评估结果表明,本文提出的模型和方法能够有效地指导交互桌面的设计.

下一步的工作是以本文方法为指导,设计适合于交互桌面的交互技术,并进一步丰富界面工具 MTBuilder,使交互桌面系统的设计与开发更为简单、快捷.

References:

- [1] Wigdor D, Williams S, Cornin M, Levy R, White K, Mazeev M, Benko H. Ripples: Utilizing per-contact visualizations to improve user interaction with touch displays. In: Wilson A, ed. Proc. of the 22nd Annual ACM Symp. on User Interface Software and Technology. New York: ACM, 2009. 3–12. [doi: 10.1145/1622176.1622180]
- [2] Wilson AD, Izadi S, Hilliges O, Mendoza AG, Kirk D. Bringing physics to the surface. In: Cousins, ed. Proc. of the 21st Annual ACM Symp. on User Interface Software and Technology. New York: ACM, 2008. 67–76. [doi: 10.1145/1449715.1449728]
- [3] Penichet VMR, Lozano MD, Gallud JA, Tesoriero R. User interface analysis for groupware applications in the TOUCHE process model. *Advances in Engineering Software*, 2009,40(12):1212–1222. [doi: 10.1016/j.advensoft.2009.01.026]
- [4] Puerta A, Eisenstein J. Towards a general computational framework for model-based interface development systems. In: Maybury MT, ed. Proc. of the Knowledge-Based Systems, the 4th Int'l Conf. on Intelligent User Interfaces. New York: ACM, 1999. 433–442. [doi: 10.1145/291080.291108]
- [5] Wu M, Balakrishnan R. Multi-Finger and whole hand gestural interaction techniques for multi-user tabletop displays. In: Konstan JA, ed. Proc. of the 16th Annual ACM Symp. on User Interface Software and Technology. New York: ACM, 2003. 193–202. [doi: 10.1145/964696.964718]
- [6] Morris MR, Huang A, Paepcke A, Winograd T. Cooperative gestures: Multi-User gestural interactions for co-located groupware. In: Grinter R, Rodden T, Aoki P, Cutrell E, Jeffries R, Olson G, eds. Proc. of the SIGCHI Conf. on Human Factors in Computing Systems. New York: ACM, 2006. 1201–1210. [doi: 10.1145/1124772.1124952]
- [7] Weiss M, Wagner J, Jansen Y, Jennings R, Khoshabeh R, Hollan JD, Borchers J. SLAP widgets: Bridging the gap between virtual and physical controls on tabletops. In: Olsen DR, ed. Proc. of the 27th Int'l Conf. Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems. New York: ACM, 2009. 3229–3234. [doi: 10.1145/1518701.1518779]
- [8] Tse E, Greenberg S, Shen C. GSI demo: Multiuser gesture/speech interaction over digital tables by wrapping single user applications. In: Quek F, Yang J, eds. Proc. of the 8th Int'l Conf. on Multimodal. New York: ACM, 2006. 76–83. [doi: 10.1145/1180995.1181012]
- [9] Ryall K, Esenther A, Everitt K, Forlines C, Morris MR, Shen C, Shipman S, Vernier F. iDwidgets: Parameterizing widgets by user identity. *Computer Science*, 2005,3585:1124–1128.
- [10] Forlines, C, Esenther A, Shen C, Wigdor D, Ryall K. Multi-User, multi-display interaction with a single-user, single-display geospatial application. In: Wellner P, ed. Proc. of the 19th Annual ACM Symp. on User Interface Software and Technology. New York: ACM, 2006. 273–276. [doi: 10.1145/1166253.1166296]
- [11] Forlines C, Lilien, R. Adapting a single-user, single-display molecular visualization application for use in a multi-user, multi-display environment. In: Levialdi S, Gesu VD, Tarantino L, eds. Proc. of the Working Conf. on Advanced Visual Interfaces. New York: ACM, 2008. 367–371. [doi: 10.1145/1385569.1385635]
- [12] Wigdor D, Shen C, Forlines C, Balakrishnan R. Table-Centric interactive spaces for real-time collaboration. In: Celentano A, ed. Proc. of the Working Conf. on Advanced Visual Interfaces. New York: ACM, 2006. 103–107. [doi: 10.1145/1133265.1133286]
- [13] Everitt K, Shen C, Ryall K, Forlines C. MultiSpace: Enabling electronic document micro-mobility in table-centric, multi-device environments. In: Fjeld M, Takatsuka M, eds. IEEE Int'l Workshop on Horizontal Interactive Human-Computer Systems. Washington: IEEE Computer Society, 2006. 27–34.

- [14] Paterno F, Mancini C, Meniconi S. ConcurTaskTrees: A diagrammatic notation for specifying task models. In: Howard S, Hammond JH, Lindgaard G, eds. Proc. of the IFIP TC13 6th Int'l Conf. on Human-Computer Interaction. London: Chapman & Hall, 1997. 362–369.
- [15] Cooper A, Reimann R, Cronin D. About Face 3: The Essentials of Interaction Design. 3rd ed., New York: Wiley, 2007. 170–179.
- [16] Green M, Jacob R. Software architectures and metaphors for non_WIMP user interfaces. Computer Graphics, 1991,25(3):229–235. [doi: 10.1145/126640.126677]
- [17] Dam AV, Univ B. Post-WIMP user interfaces. Communications of the ACM, 1997,40(2):63–67. [doi: 10.1145/253671.253708]
- [18] Beaudouin-Lafon M. Instrumental interaction: An interaction model for designing post-WIMP user interfaces. In: Turner T, Szwillus G, eds. Proc. of the SIGCHI Conf. on Human Factors in Computing Systems. New York: ACM, 2000. 446–453. [doi: 10.1145/332040.332473]
- [19] Tandler P. The BEACH application model and software framework for synchronous collaboration in ubiquitous computing environments. Journal of Systems and Software, 2004,69(3):267–296. [doi: 10.1016/S0164-1212(03)00055-4]
- [20] Stewart J, Bederson BB, Druin A. Single display groupware: A model for co-present collaboration. In: Williams MG, Altom MW, eds. Proc. of the SIGCHI Conf. on Human Factors in Computing Systems. New York: ACM, 1999. 286–293. [doi: 10.1145/302979.303064]
- [21] Norman DA, Bobrow DG. On data-limited and resource-limited processes. Cognitive Psychology, 1975,7(1):44–64.
- [22] Scott SD, Sheelagh M, Carpendale T, Inkpen KM. Territoriality in collaborative tabletop workspaces. In: Herbsleb J, Olson G, eds. Proc. of the 2004 ACM Conf. on Computer Supported Cooperative Work. New York: ACM, 2004. 294–303. [doi: 10.1145/1031607.1031655]
- [23] Liu JS, Zhang FJ, Tan GF, Dai ZJ, Dai GZ, Wang HA. MTBuilder: A user interface toolkit for multi-touch tabletop. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2011,23(10):1649–1655 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献:

- [23] 刘佳升,张凤军,谭国富,戴志军,戴国忠,王宏安.MTBuilder:一个多触点交互桌面界面工具.计算机辅助设计与图形学学报,2011, 23(10):1649–1655.



刘佳升(1987—),女,山西临县人,博士生,CCF 学生会员,主要研究领域为人机交互,交互桌面.



戴国忠(1944—),男,研究员,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为人机交互,计算机图形学.



张凤军(1971—),男,博士,副研究员,CCF 高级会员,主要研究领域为人机交互,虚拟现实,CAD.



王宏安(1963—),男,博士,研究员,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为实时智能,用户界面.



任磊(1979—),男,博士,讲师,主要研究领域为信息可视化.