

协作笔式用户界面开发工具研究^{*}

周明骏^{1,2+}, 徐礼爽¹, 田 丰¹, 戴国忠¹

¹(中国科学院 软件研究所 人机交互技术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 100049)

Research on Development Tools for Collaborative Pen-Based User Interfaces

ZHOU Ming-Jun^{1,2+}, XU Li-Shuang^{1,2}, TIAN Feng¹, DAI Guo-Zhong¹

¹(Laboratory of Human-Computer Interaction & Intelligent Information Processing, Institute of Software, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

²(Graduate University, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

+ Corresponding author: E-mail: mingjun02@ios.cn

Zhou MJ, Xu LS, Tian F, Dai GZ. Research on development tools for collaborative pen-based user interfaces. *Journal of Software*, 2008,19(10):2780–2788. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/19/2780.htm>

Abstract: Pen-Based user interface is a primary Post-WIMP (window icon menu pointer) interface, and it provides natural interactions for users. However, the current toolkits for constructing pen-based user interface are built for single-user tasks, which can not support collaborative work well. This paper analyzes the features of pen-based interaction and collaboration environment. Furthermore, the design and implementation of a toolkit, CoPen Toolkit, which can support the development of collaborative pen-based user interfaces are discussed. CoPen Toolkit offers flexible architecture and extended components, which can support ink-based data, event processing, networked collaboration, etc. Based on CoPen Toolkit, several typical prototypes have been built, and the results show that it can support construction and fast-prototyping of collaborative pen-based user interfaces.

Key words: collaborative pen-based interaction; user interface; toolkit

摘 要: 笔式用户界面是一种重要的 Post-WIMP(window icon menu pointer)界面,它给用户提供了自然的交互方式.然而,当前的笔式用户界面工具箱大多是面向单用户任务的,不能很好地支持协作应用场景.通过对笔式交互特征和协作环境功能需求的分析,设计并实现了一个工具箱 CoPen Toolkit,用于支持协作笔式用户界面的开发.它提供了灵活的架构和可扩展的组件,支持笔迹描述、事件处理和网络协作等功能.基于 CoPen Toolkit,构造了多个原型系统,实践表明,它能够很好地支持协作笔式用户界面的开发.

关键词: 协作笔式交互;用户界面;工具箱

中图法分类号: TP391 **文献标识码:** A

用户界面的发展至今经历了 3 个主要的阶段——批处理方式、命令行方式和 WIMP(Window icon menu

^{*} Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant Nos.60503054, U0735004 (国家自然科学基金); the National High-Tech Research and Development Plan of China under Grant No.2007AA01Z158 (国家高技术研究发展计划(863))

Received 2007-07-30; Accepted 2008-02-25

pointer)方式,从早期以计算机系统为中心到如今以用户为中心,用户界面越来越向着人性化、智能化方向发展。虽然 WIMP 界面较以前的界面形式有明显的优点,但随着计算机硬件设备的进步和软件技术的发展,WIMP 界面的不足之处也逐渐体现出来,研究者们将研究的焦点聚集到对下一代用户界面的研究上。针对下一代的用户界面的这些特征,研究者们提出了 Post-WIMP 的思想,Post-WIMP 是指至少包含了一项不基于传统 WIMP 的交互组件技术^[1],它们都基于以用户为中心的界面设计思想,力求为人们提供更为自然、高效的人机交互方式。同时,网络通信技术的发展使计算机不仅是辅助人们工作的工具,而且使之成为了人与人之间交流的媒质,人机交互研究的焦点不再局限于单人交互任务,而已扩展到了多人协作交互任务^[2]。通过建立计算机支持的分布式计算协作环境,可以消除或减少人们在时间和空间上的隔阂和障碍,改善人们进行信息交流和共享的方式,提高群体工作质量和效率。

笔式用户界面是 Post-WIMP 界面的一个重要形态^[3],与传统的 WIMP 界面相比,笔式用户界面能够更好地适用于无处不在的计算^[4]。基于纸笔隐喻的笔式交互提供了自然、高效的交互方式,能够在保持传统工作方式自然性的同时高效地利用计算资源,因而适用于网络环境下的多人讨论、思维捕捉,能够有效地实现信息交流和共享。

1 相关工作介绍

在笔式用户界面工具的研究中,出现了很多商业产品和原型系统。商用的笔式开发工具箱都提供了笔迹勾画和手势识别的功能,但是整体风格还是 WIMP 界面形式,没有真正实现自然、自由的笔式界面风格。在研究领域,越来越多的系统^[5-7]把笔迹当成第 1 类(first-class)的对象进行处理,提供了笔迹收集、笔迹实时反馈、笔迹分析识别等功能;在系统结构上,层次化事件处理和面向对象的界面组织方式逐渐得到了大家的认可。然而现有的工具箱对于无处不在计算所需要的分布式计算、Ink 的结构化和共享的特征支持均存在不足,因而很难直接用于协作笔式应用的开发。

当前笔式交互已经开始用于分布式环境中。Livenotes^[8]是一个面向课堂教学的共享白板系统,它通过无线网络和平板电脑技术来支持协同笔记记录和批注,有效地提高了课堂学习效率。Classroom Presender^[9]是一个面向教学的分布式演讲系统,它能够在老师、学生之间共享讲稿,学生可以用笔写下答案然后传送给老师,老师可以对学生的答案进行选择展示并进行点评,它增强了教学的灵活性,促进了师生之间的互动。CoffferenceXP^[10]是一个分布式应用的平台,它提供了可扩展的会议和协作功能,并且内置了对 Ink 计算的支持。然而现有分布式环境下的笔式应用虽然支持笔迹传输,具有页式管理的功能,但都只是停留在用笔代替鼠标的层次上,无法支持笔交互连续性、多维性、隐含性的特点。

从现有研究可以看出,笔交互的相关研究还集中在单人单任务的应用上,没有扩展到多人协作应用上;而协作用户界面的研究关注焦点则集中于传统的 WIMP 用户界面。当前,虽然出现了支持协作笔交互的平台,但是功能贫乏,不足以支持笔交互的丰富语义。由于当前缺乏一个针对协作笔式交互的工具箱,这使得协作笔式应用的构造变得困难。

2 需求分析

本文观察了多人讨论、头脑风暴、草图概念设计等典型的笔式协作交互场景。参与者通常倾向于用纸笔或者白板这一类工具来表达自己的思想和见解,强调书写和操纵的自由性,对精确性的要求不高。协作笔交互涉及到地域分散的多个参与者,参与者通过共享空间进行思维交流,因此支持分布式环境下笔式交互的自然、高效性以及协同感知功能就显得十分重要。通过用户行为观察和需求分析,本文认为:设计并实现一个可复用、可扩展的支持协作笔式应用的工具箱,需要考虑如下几个问题:

- Ink 数据表示。Ink 是笔式用户界面的基本数据类型,它既是界面中数据信息的表示单元,也是交互信息的表示单元。Ink 信息不仅仅是一个二维坐标点的序列,还包含了压力、倾角等信息。因而工具箱需要支持 Ink 数据的表示以及建立在 Ink 数据之上的文档表示。

- 事件处理.当前的笔式交互设备产生的信息远远多于鼠标的信息,然而现有界面工具箱并没有提供针对笔的专用事件接口,因而不足以充分利用笔的交互自然性和丰富的交互意图.此外,协作环境中还存在大量非交互性事件.因此统一描述这些事件,并提供一致的处理接口是工具箱的任务之一.
- 网络通信与协作.协作笔式交互需要支持地域分散的多个参与者的并发交互,因此,工具箱需要提供灵活的通信方式,维护群体感知并保持数据的一致性.
- 统一的架构.在使用纸笔进行思维表达和交流时,既可以是个体行为也可能是群体协作行为,两者之间存在着频繁的切换.因此协作笔式交互工具箱需要以统一的方式支持单人应用和多人协作应用,从而使界面能够在两者之间进行无缝切换,为用户提供一致的交互方式.

基于上述分析,本文设计并实现了工具箱 CoPen Toolkit.下面,我们主要从工具箱的组成结构、Ink 语义对象组织、事件处理、通信协作和运行时架构等方面进行论述.

3 工具箱描述

CoPen Toolkit 主要由以下几部分组成(如图 1 所示):Ink 数据表示主要用于描述不同层次的 Ink 数据对象;Ink 算法用于笔迹结构识别、内容识别等;用户界面组件提供了模块化的界面对象,能够很好地支持界面构造;用户界面事件是对各种界面事件的统一抽象和表示;基于 IM(instant messaging)的通信基础提供了基本的网络即时通信功能;会话管理提供了参与者加入、离开共享空间的机制;一致性维护用于保持各个站点之间的数据一致性.

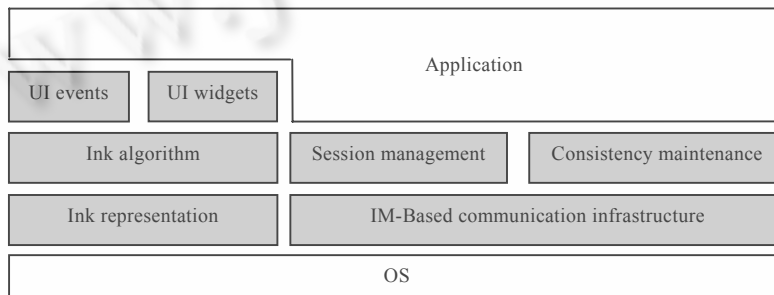


Fig.1 The components of CoPen Toolkit

图 1 CoPen Toolkit 的组成部分

3.1 Ink语义对象

在笔式用户界面中,笔迹是笔交互产生的主要信息.笔迹信息本身具有丰富的表达能力,笔迹包含有时间、压力、颜色、倾角等多维度的信息.将用户输入的笔迹信息转化为格式化的信息,会丢失大量的原始信息,不利于进一步识别和操纵.然而,将笔迹保存为位图的传统方法也会丢失许多结构信息,此外,它还需要大量的存储空间,尤其是在分布式网络环境及网络带宽不足的情况下,不利于笔迹的实时交流.

笔迹大多会呈现出层次化结构信息,因而在工具箱中,本文采用了类似于场景图^[11]的方式来描述各个粒度的笔迹信息.图 2 表示了一个 Ink 文档涉及到的各种数据结构,这些不同粒度的数据结构分别是:文档(document)、页(page)、区域(region)、笔划簇(cluster)、笔划(stroke)和点.点和笔划是笔式交互中的基本单位,点包含了坐标、压力、倾角等信息,笔划则是在笔按下和抬起之间的一组采样点的序列.为了保证工具箱的通用性和可扩展性,这里区分了笔划簇和区域,其中区域是附加了特定属性、行为的笔划簇.这样根据具体应用需求,可以指定笔划簇的区域类型,这一过程可以由计算机识别自动完成,也可以由用户参与的方式来完成.不同类型的区域其交互方式和反馈均不相同.

3.2 事件模型

通过事件处理模块,CoPen Toolkit 能够收集并发送用户的各种事件信息.CoPen Toolkit 提供了事件的描述

方法和事件的处理方式.这样,参与者的各种事件信息可以以统一的形式发送给其他参与者,同时也可以接受并处理其他参与者的信息,以此来实现协作交互.

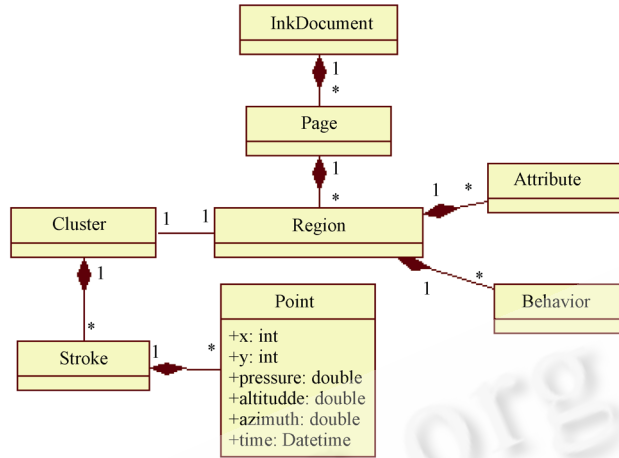


Fig.2 Hierarchy of ink semantic objects
图2 Ink 语义对象层次

笔式交互的连续性和隐含性特点,与传统的基于鼠标和键盘的交互有着很大的不同,因此 WIMP 界面中的离散事件模型并不适用于描述笔式交互.笔式用户界面的交互过程如图 3 所示,各种底层笔设备产生的原始输入信息(位置,压力,倾角等)以统一的形式进行描述,形成基本的交互行为;笔式界面中连续的交互行为会形成一个完整的交互过程,每个交互过程都经过了按下、移动、抬起这几个阶段;每一次完整的交互过程结束后会形成一个 stroke,通过用户参与和上下文感知的方式对 stroke 进行分析,可以生成符合用户交互意图的交互任务;最后通过对交互任务的执行可以得到用户期望的结果.行为事件和任务事件的区别在于,行为事件的执行不会修改文档数据,而任务事件的执行往往会对文档本身进行修改.

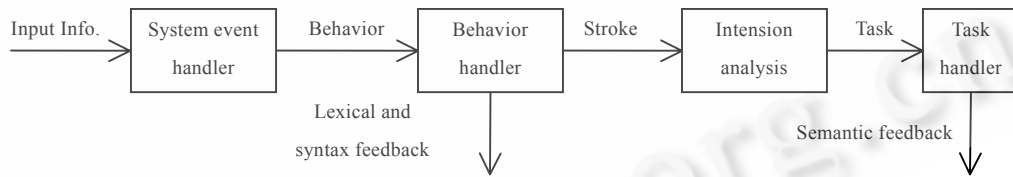


Fig.3 Framework of the pen-based interaction process
图3 笔式交互过程处理框架

在笔式协作交互中,还存在大量非交互性事件,这些事件有助于参与者即时了解当前共享工作空间中的其他参与者的信息.因此,除了描述用户使用笔进行操作时产生的行为和任务外,本文还需要描述用户的当前状态和交互意图.如图 4 所示,本文按照内容可以分为会话事件和交互事件两类.会话事件分为用户意图事件和用户状态事件,其中用户意图事件包含用户当前的位置和关注焦点,而用户状态事件包含了进入、离开、状态改变等.交互事件分为行为事件和任务事件,其中行为事件包含笔交互的过程信息,笔的落下、移动和抬起;任务事件描述一个完整的笔交互过程后需要执行的各种交互任务,如书写选择、指点、操纵.

3.3 通信与协作

CoPen Toolkit 采用了基于 IM 的通信方式来支持笔式交互的连续性.由发起者创建协作会话,并主动邀请其他参与者加入到当前会话,即可以开始进行协作交互.会话管理和数据维护都在客户端完成,不需要额外的数据服务器支持,这种轻量级、灵活的协作方式更符合无处不在的计算模式.下面将详细阐述 CoPen Toolkit 的网络

结构、通信模式和数据一致性维护.

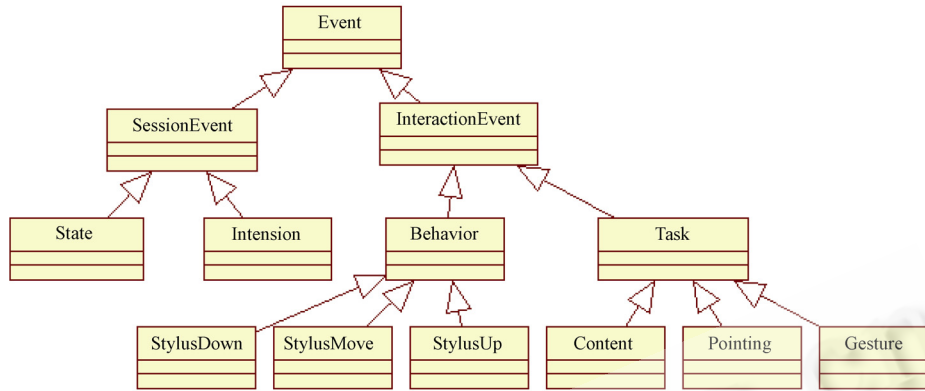


Fig.4 Hierarchy of events

图 4 事件层次

3.3.1 网络结构

协作笔交互涉及到多个参与者同时进行操作,笔交互的连续性特征要求系统能够即时传输用户的各种操作,因而工具箱通过扩展标准的即时通信协议 XMPP(extensible messaging and presence protocol)^[12]做到即时响应.为了保持笔交互的自然、高效的特性,系统采用了全复制制(full-replicated)结构^[13],将协作过程的各种数据分别对等地复制在各个参与者的系统中,这样只需要传播用户的操作命令即可,避免了大量底层数据的多次传输,以提高系统的响应速度和可用性.

如图 5 所示,客户端分为用户界面、事件处理器、一致性维护模块、任务处理和数据.客户端之间的信息传递是通过接收器和发送器完成的.本地产生的各种事件会被本地事件处理器处理,同时还会以广播的形式发送给当前会话中的其他参与者;接收到的远端事件由远端事件处理器处理.用户的交互过程只需给出相应的界面反馈即可,在执行交互任务时会改变底层数据,因而对本地任务事件和远端任务事件需要进行一致性维护处理然后执行,这样才能保证底层数据的一致性.

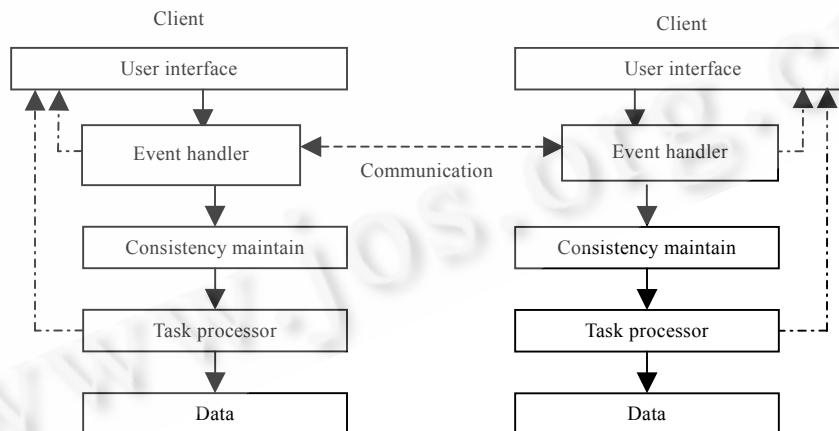


Fig.5 Overview of application framework

图 5 应用框架

3.3.2 基于事件通信模式

在 CoPen Toolkit 中,本文使用 XML 语言来表达协作笔交互应用中的各种事件,XML 的可扩展特性使之能够以统一的方式描述各种事件,从而极大地方便了协议的扩展和系统对协议的集成.

参与者引发的各种事件被封装成 XML 节,每一个 XML 节表示一个单一的事件,客户端通过解析 XML 字符流还原事件,然后根据会话标志符和事件参数将事件发送给上层应用的处理模块。

参与者之间的各种事件可以用一个四元组描述(addresses,userId,event,sessionId),

- Addresses:描述当前会话中的其他参与者的网络标志符
- UserId:描述了本地参与者的网络标志符
- Event:描述了事件的类型、标志符和相关参数
- SessionId:描述了当前会话的标志符

图 6 的 XML 是对 StylusMove 事件的描述.用户 User C 向用户 User A 和 User B 发送了笔书写过程的移动消息,其中包含了笔当前的位置、压力、倾角和时间信息。

```
<message from='initiator@10.0.0.4/iel' to='userA@10.0.0.4/iel' type='normal'>
  <addresses xmlns='http://jabber.org/protocol/address'>
    <address type='to' jid='UserA@iel.iscas.ac.cn/lab'/>
    <address type='to' jid='UserB@iel.iscas.ac.cn/lab'/>
  </addresses>
  <UserId>UserC@10.0.0.4/iel</UserId>
  <SessionId>3587b40c-dea7-401d-a5c7-536b4ec4f184</SessionId>
  <Event>
    <type>StylusMove</type>
    <params>
      <x>965</x><y>732</y><pressure>3.2</pressure>
      <angle>62.5</angle><time>1187591117</time>
    </params>
  </Event>
</message>
```

Fig.6 XML description of a StylusMove event

图 6 StylusMove 事件的 XML 表示

3.3.3 一致性维护

在笔式协作交互中,由于涉及到地域分散的多个参与者的并行操作,当多个参与者同时操纵同一界面元素时会产生冲突,此时需要采取合适的冲突消解和并发控制方法来保证底层共享数据在各个站点上的一致性。

常见的一致性维护算法有轮换(turn-taking)、序列化(serialization)、锁(lock)等方法.轮换的方法同时只允许一个参与者进行操作.序列化方法需要一个中心服务器,并且要求操作之间相对次序不敏感,否则序列化的结果不能收敛.锁方法会导致用户界面受限,限制了用户交互的自由性.这些都导致了它们并不适用于基于即时通信的全复制架构下的协作笔式交互应用。

操作转换算法能够自动地解决冲突而无需手工干预,有良好的实时响应性,能够保持收敛性和交互维护意愿,有利于保证交互的自然性.笔式用户界面的组成元素是页、区域、笔迹簇、笔划等,其共享数据可以表示为树状层次结构,对某个对象属性的修改不会影响同一层次的其他对象,因而本文通过扩展 treeOPT 算法^[14]使之满足协作笔式交互中的底层数据结构,以此来实现数据的一致性,这里不再赘述.这样,多个用户修改笔迹对象的时候不会有停滞感,能够更好地保留笔迹交互的自然性。

3.4 界面组织架构

CoPen Toolkit 采用了一种多代理的结构,在这种结构中,每一种交互构件(如页、框等)都可以根据自己的状态动态地分析用户的输入,根据当前的上下文信息进行相应的处理,它还可以接受用户的主动介入来更改自己的分析结果。

传统的运行时架构强调了功能面的分离,如 MVC(model-view-control)将构件分为模型、视图和控制 3 部分,PAC(presentation-abstract-control)将构件分为表示、抽象和控制 3 部分.但是,有效的复用不仅建立在可复用的构件之上,它和构件之间的结合方式也密切相关^[15].因而本文在这里强调了连接器和控制结构,这样能够对构件之间的各种消息进行约束处理.如图 7 所示,每个构件都是由连接器、控制器和处理器 3 部分构成.其中连接

器的主要作用是通过接收器和发送器进行构件之间的事件传递;控制器接收到具体事件后,其内置的控制逻辑决定了它对事件的处理逻辑,通常需要调用相应的处理器对事件进行处理,或者将接受到的事件通过连接器转发给其他构件;处理器负责对具体事件的处理,当前主要有行为处理器和任务处理器两种.

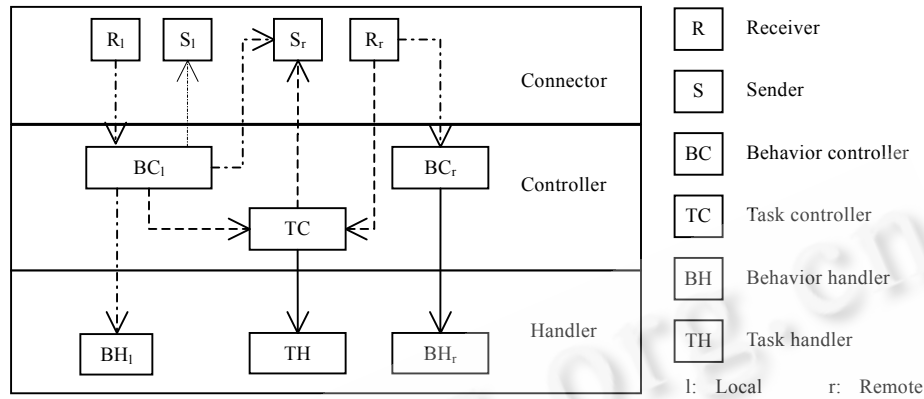


Fig.7 Connector-Controller-Handler framework
图7 连接器-控制器-处理器框架

值得注意的是,连接器分为面向本地和面向远端两类,分别负责与本地其他构建通信和与远端对应构建通信.其次,对本地和远端行为采用了不同的处理逻辑,以此来区分反馈和馈通.对本地和远端任务,任务控制器首先调用一致性维护算法进行矫正,然后交给任务处理器统一处理.

运用连接器可以使构件之间采用统一的数据及控制接口,从而提高了构件以及连接器的可复用性.同时,连接器的存在使得构件可以分布在不同的物理空间,在协作笔式交互应用中(如图8所示),参与者在交互中产生的各种事件不仅会分发给本地的其他构件,还会根据需求分发给其他参与者的相应构件,以此来支持分布式的协作界面交互.在实际应用中,通过屏蔽远端发送器和远端接收器,就可以使各种事件只在本地构件之间传递,从而支持单人笔交互应用.这样不需要修改控制器的控制逻辑和处理器的处理方式就可以同时支持单人笔交互场景和协作笔交互应用场景.因而该运行时架构同样可以用于单人笔交互应用的实现,使单人笔交互应用和协作笔交互应用保持一致的运行时的架构,有利于实现单人和协作场景的无缝切换.

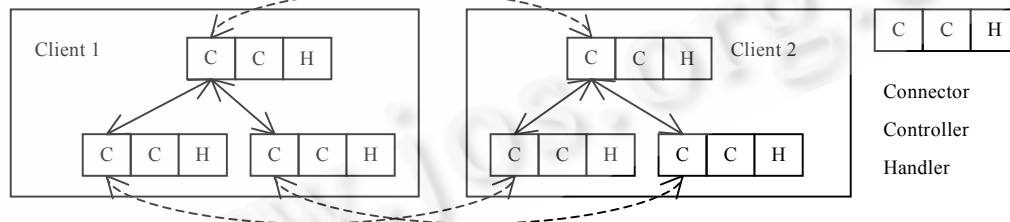


Fig.8 Connector-Controller-Handler framework
图8 连接器-控制器-处理器框架

4 应用实例

利用 CoPen Toolkit,可以方便地构造各种协作笔式交互应用系统.目前,利用 CoPen Toolkit 已经开发出多个具有良好应用前景的软件系统.

协作概念图系统(如图9所示)是一个面向学生的笔式协作学习工具.它能够帮助学生在课堂上快速记笔记,

同时可以以概念图的形式来组织学到的知识点.每个参与者都能够在共享工作空间中创建、连接概念,参与者可以看到其他人的状态和实时的笔迹操作,由于提供了笔式交互这种更加自然的交互方式,用户不必频繁地用鼠标来指点并用键盘输入内容,保持了用户思维的连贯性,减轻了用户的认知负担.根据用户选择的当前概念,系统能够自动地从知识库中搜索概念相关的信息并加以提示.实践表明,该系统能够较好地支持概念交流和讨论.

协作演示制作系统(如图 10 所示)是一个讲稿制作系统.通过该系统,用户可以像使用普通的笔和纸一样,自由地书写公式、图形和文字,并通过笔手势进行修改.系统会智能化地识别用户书写的公式和文字.此外,当多个用户同时参与制作时,系统会自动地展示其他用户的操作,这样可以增强相互之间的理解,使得讲稿制作更加便捷.

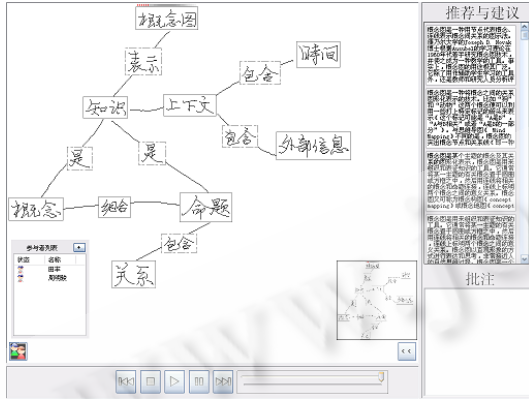


Fig.9 CoConceptMap system
图 9 协作概念图系统

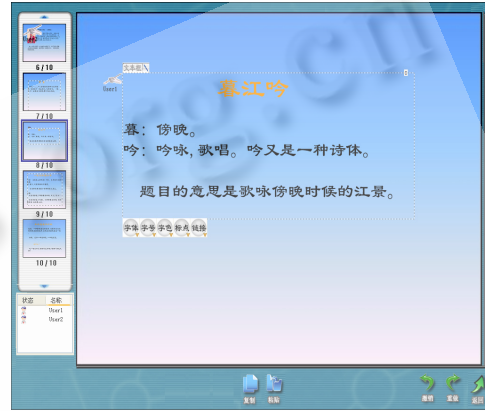


Fig.10 CoPenSlide system
图 10 协作笔式讲稿系统

5 结 论

笔式交互是一种自然、高效的交互方式,然而支持协作笔式交互的应用系统的构造是一项非常困难的工作.通过对协作笔交互应用需求的分析,本文构造了支持一种新颖的协作笔式界面工具箱 CoPen Toolkit,用于支持协作笔式应用的快速构造和开发.工具箱对 Ink 语义对象、事件处理、通信协作和运行时架构等方面进行了抽象和封装,这样,用户可以将更多的精力集中在具体应用语义的处理上,而不需要过多地考虑底层支撑结构.实践表明,协作笔式交互工具箱能够较好地支持协作笔式交互应用系统的构造.

References:

- [1] Dam A. Post-WIMP user interfaces. *Communications of ACM*, 1997,40(2):63-67.
- [2] Peter J, Jon M, Hilary J. Introduction to multiple and collaborative tasks. *ACM Trans. on Computer Human Interaction*, 2003,10(4): 277-280.
- [3] Dai GZ. Pen-Based user interface. In: Shen WM, ed. *Proc. of Computer Supported Cooperative Work in Design*. New York: Springer-Verlag, 2004. 32-26.
- [4] Abowd GD, Mynatt ED. Charting past, present, and future research in ubiquitous computing. *ACM Trans. on Computer Human Interaction*, 2000,7(1):29-58.
- [5] Jason IH, James AL. SATIN: A toolkit for informal ink-based applications. In: Pierre W, Ken H, eds. *Proc. of the 19th Annual ACM Symp. on User Interface Software and Technology*. New York: ACM, 2006. 63-72.
- [6] Li Y, Guan ZW, Dai GZ. Research on development tools for pen-based user interfaces. *Journal of Software*, 2003,14(3):392-400 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/14/392.htm>

- [7] Tian F, Qin YY, Wang XC, Ao X, Wang HA, Dai GZ. Analysis and design on PIBG Toolkit: A pen based user interface Toolkit. Chinese Journal of Computers, 2005,28(6):1036-1042 (in Chinese with English abstract).
- [8] Kan M, Wang JT, Iles A, Tse E, Chiu J, Glaster D, Tarshish O, Canny J. Livenotes: A system for cooperative and augmented note-taking in lectures. In: Zhai SM, Kellogg W, eds. Proc. of the SIGCHI Conf. on Human factors in Computing Systems. New York: ACM, 2005. 531-540.
- [9] Anderson Ri, Anderson Ru, Davis KM, Linnell N, Prince C, Razmov V. Supporting active learning and example based instruction with classroom technology. SIGCSE Bulletin. 2007,39(1):69-73.
- [10] Needham T. Conf. XP and advanced collaborative scenarios. In: Smari WW, McQuay W, eds. Proc. of the 2006 Int'l Symp. on Collaborative Technologies and Systems. IEEE Computer Society, 2006. 392.
- [11] Paul S, Rikk C. An object-oriented 3D graphics toolkit. ACM SIGGRAPH Computer Graphics, 1992,26(2):341-349.
- [12] Saint-Andre P. Extensible messaging and presence protocol (XMPP): Core. RFC 3920, 2004. <http://www.xmpp.org/rfc/rfc3920.html>
- [13] Clarence A, Simon J, Gail R. Groupware: Some issues and experiences. Communications of ACM, 1991,34(1):39-58.
- [14] Claudia-Lavinia I, Moira C. Customizable collaborative editor relying on treeOPT algorithm. In: Kari K, Eija HK, eds. Proc. of the 8th Conf. on European Conf. on Computer Supported Cooperative. Kluwer Academic Publishers, 2003. 315-334.
- [15] Mary S. Architectural issues in software reuse: It's not just the functionality, it's the packaging. ACM SIGSOFT Software Engineering Notes, 1995,20(SI):3-6.

附中文参考文献:

- [6] 栗阳,关志伟,戴国忠. 笔式用户界面开发工具研究. 软件学报, 2003,14(3):392-400. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/14/392.htm>
- [7] 田丰,秦严严,王晓春,敖翔,王宏安,戴国忠. PIBG Toolkit: 一个笔式界面工具箱的分析与设计. 计算机学报, 2005,28(6): 1036-1042.



周明骏(1982-),男,湖北潜江人,博士生,CCF 学生会员,主要研究领域为人机交互技术,协同计算.



田丰(1976-),男,博士,副研究员,主要研究领域为人机交互技术,虚拟现实.



徐礼爽(1982-),男,博士生,主要研究领域为人机交互技术,自适应用户界面.



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技术,计算机图形学.