

# 增强现实综述

朱淼良<sup>1)</sup> 姚远<sup>1)</sup> 蒋云良<sup>1),2)</sup>

<sup>1)</sup>(浙江大学计算机学院,杭州 310027) <sup>2)</sup>(湖州师范学院信息工程学院,浙江湖州 313000)

**摘要** 增强现实(augmented reality, AR)技术可以将虚拟的物体合并到现实场景中,并能支持用户与其进行交互,它已经成为虚拟现实研究中的一个重要领域,也是人机界面技术发展的一个重要方向。为了使人们对其有所了解,该文首先概略描述了这个领域的主要研究内容和进展情况,并详细介绍了增强现实中的支撑技术、开发工具和相关理论;然后针对当前AR应用的现状,分析了实现中的难点问题,并给出了与AR普及应用密切相关的一些系统框架和开发平台的描述,最后介绍了几个典型的AR应用实例。

**关键词** 增强现实 虚拟现实 人机界面

中图法分类号: TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2004)07-0767-08

## A Survey on Augmented Reality

ZHU Miao-liang<sup>1)</sup>, YAO Yuan<sup>1)</sup>, JIANG Yun-liang<sup>1),2)</sup>

<sup>1)</sup>(College of Computer Science, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

<sup>2)</sup>(School of Information Engineering, Huzhou Teachers College, Huzhou Zhejiang 313000)

**Abstract** This paper presents a survey on the field of Augmented reality(AR), which combines virtual computer-generated material with the surrounding physical world, registers real and virtual object with each other and runs interactively at real time. Now it has become an important research field in VR and next generation of human computer interface. This paper introduces the primary content and state of art in this field. The key technologies, including basic tracking methods, display devices and registration processes, are discussed. Many typical AR applications and developing tools are listed. It describes the characteristic of AR system, with a detail analyzing of some technology difficult problems in AR system. The corresponding solutions are also mentioned. Currently research in AR field is largely focus on the AR system frameworks. Which usually gives a unified interface that supporting heterogeneous AR display devices in different AR applications. The AR frameworks also make the design of AR applications become more convenient. Two most influential AR frameworks, Studierstube and DWARF, are introduced. This survey provides a start point for anyone interested in AR research.

**Keywords** augmented reality, virtual reality, human computer interface

## 1 引言

与传统虚拟现实技术所要达到的完全沉浸的效果不同,增强现实技术致力于将计算机生成的物体叠加到现实景物上。它通过多种设备,如与计算机相连接的光学透视式头盔显示器(optical see-through head-mounted display,后简称S-HMD)或配有各种成像原件的眼镜等,让虚拟物体能够叠加到真实场

景上,以便使它们一起出现在使用者的视场中。同时,使用者可以通过各种方式来与虚拟物体进行交互,例如,在装配或维修工作中,基于增强现实技术的应用系统会在操作人员视野的相应位置显示出有用的提示信息;又如在使用增强现实技术的培训系统中,甚至可以将虚拟物体和实际配件装配在一起。增强现实技术在工业设计、机械制造、建筑、教育和娱乐等领域都有着广泛的应用前景,而且它不仅提供了一种更容易实现的虚拟现实的方法,更代表了

下一代更易使用的人机界面的发展趋势。

## 2 增强现实的研究与进展综述

20 世纪 90 年代初期,波音公司的 Tom Caudell 和他的同事在他们设计的一个辅助布线系统中提出了“增强现实”(augmented reality, 简称 AR)这个名词<sup>[1]</sup>。在他们设计的系统<sup>[2]</sup>中,应用 S-HMD 把由简单线条绘制的布线路径和文字提示信息实时地叠加在机械师的视野中,而这些信息则可以帮助机械师一步一步地完成一个拆卸过程,以减少在日常工作中出错的机会。接下来又相继出现了多种增强现实应用系统,主要集中在医疗、制造与维修、机器人动作路径的规划、娱乐和军事等几个方面。但是由于设备和精度等方面的原因,所有这些系统都没有真正投入实际应用,Azuma 在 1997 年曾对这些系统和其使用的基本技术给出过一个详尽的综述<sup>[3]</sup>。

同沉浸式的虚拟现实相比,增强现实不但应用的场合广泛,而且更加安全,因为增强现实系统可以让用户在看到虚拟物体的同时,仍能看到真实的场景,即使在停电和设备故障等情况下,也能保证用户的安全。20 世纪 90 年代末,这个领域的研究者们开始聚会在一系列每年召开的和增强现实相关的国际研讨会和工作会议上,例如,国际增强现实工作会议(IWAR)、国际增强现实研讨会(ISAR)和国际混合与增强现实会议(ISMAR)等。这些会议在很大程度上促进了 AR 的研究发展。近年来随着移动设备计算能力的增强和对网格计算环境的关注,对户外增强现实系统和支持分布式协同操作增强现实系统的研究明显增加。

## 3 增强现实系统的支撑技术

由于 AR 应用系统在实现的时候要涉及到多种因素,因此 AR 研究对象的范围十分广阔,包括信号处理、计算机图形和图像处理、人机界面和心理学、移动计算、计算机网络、分布式计算、信息获取和信息可视化,以及新型显示器和传感器的设计等。AR 系统虽不需要显示完整的场景,但是由于需要通过分析大量的定位数据和场景信息来保证由计算机生成的虚拟物体可以精确地定位在真实场景中,因此,AR 系统中一般都包含以下 4 个基本步骤:(1)获取真实场景信息;(2)对真实场景和相机位置信息进行

分析;(3)生成虚拟景物;(4)合并视频或直接显示(如图 1 所示),即图形系统首先根据相机的位置信息和真实场景中的定位标记来计算虚拟物体坐标到相机视平面的仿射变换,然后按照仿射变换矩阵在视平面上绘制虚拟物体,最后直接通过 S-HMD 显示或与真实场景的视频合并后,一起显示在普通显示器上。AR 系统中,成像设备、跟踪与定位技术和交互技术是实现一个基本系统的支撑技术。

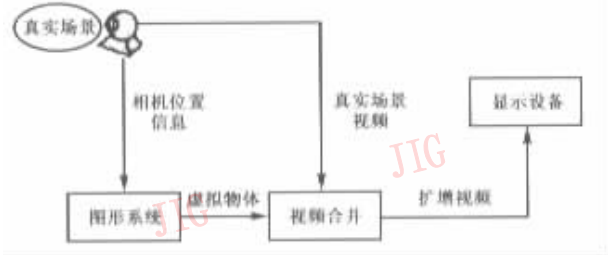


图 1 简单 AR 系统的基本流程

### 3.1 显示设备

AR 系统可以通过多种设备来显示虚拟物体和真实场景的叠加,目前最常用的就是 S-HMD。这种显示器使用了一种常称为合并器的分光镜,它能够将其上部的液晶显示器的影像反射到使用者的眼中,同时能让周遭环境的光线穿透进来(如图 2 所示)。S-HMD 虽原理简单,可以根据需要制作,但是缺点也十分明显——体积大、佩戴不便,在实际应用中对于户外使用的用户更难于接受。

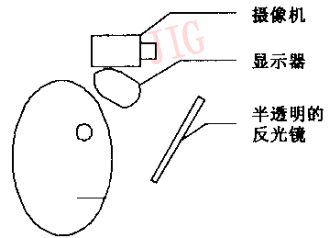


图 2 S-HMD 原理

Microvision 公司提供了称为 Nomad 的商用显示系统<sup>[4]</sup>,这个系统可以将虚拟图像直接投射到视网膜上,这种方法在一定程度上减少了显示设备的体积,并提高了输入光线的强度。首先,它可通过其内部的一个激光器,将数字图像的各个像素,以激光脉冲形式依次输出,然后利用一个微机电反射镜按照激光脉冲所代表的像素在数字图像中的位置,依次将其反射到光学图像合成器中的相应位置透镜上,最后通过透镜将光线反射到视网膜上。尽管这种

显示装置的体积明显减小,但是由于是按像素输出图像,因此速度较慢,目前的产品只能在真实场景中叠加红色的文字和线框图形。

Microoptical 公司的 Eyeglass 系列产品是将一个小彩色显示屏直接安装在普通眼镜上,这种设备仅重几十克,但是显示区域过小,且位置固定,使其应用受到限制。Minolta 公司在 2000 年提出了一个带有全息部件的眼镜式显示器原型,该显示器具有亮度高、体积小特点,但目前仍旧没有实用化的最终产品。

在 AR 系统中,也可以使用在虚拟现实中的完全封闭的显示设备,不同的是,这种显示器装有一路或两路摄像机,由于采用了视频合成技术将实景物和虚拟景物合并在一起,因此可以达到最大程度的真实效果。目前,除了使用头戴式显示设备外,基于使用方便的考虑,通常头戴式都可以改为手持式。

### 3.2 跟踪与定位系统

由于要实现虚拟和现实物体完美结合,必须将虚拟物体合并到现实世界中的准确的位置,这个过程常称为配准(registration),因此 AR 跟踪定位系统必须能够实时地检测观察者在场景中的位置、观察者头部的角度,甚至是运动的方向,以便用来帮助系统决定显示何种虚拟物体,并按照观察者的视场重建坐标系。在 AR 应用中,通常使用以下一些跟踪和定位技术:

(1) 视频检测 使用模式识别技术(包括模板匹配、边缘检测等方法)识别视频图像中预先定义好的标记、物体或基准点,然后根据其偏移和转动角度计算坐标转换矩阵。

(2) 光学系统 使用 CCD(charge coupled device)传感器,通过测量各种目标物体和基准上安装的 LED(light-emitting diode)发出的光线来测量目标与基准之间的角度,然后通过这个角度来计算出移动目标的运动方向和距离。

(3) 全球卫星定位系统(GPS) 用于户外 AR 系统中跟踪和确定用户的地理位置。

(4) 超声波 原理与 GPS 类似,即利用测量接收装置与 3 个已知超声波源的距离来判断使用者的位置。

(5) 惯性导航装置 通过惯性原理来测定使用者的运动加速度。

(6) 陀螺仪 用于测定使用者的头部转动的角

度,以判定如何转换视场中虚拟景物的坐标和内容。

(7) 磁场 通过感应线圈的电流强弱来判断用户与人造磁场中心的距离,或利用地球磁场来判断目标的运动方向。

(8) 机械装置 利用机械装置各个节点之间的长度和节点连线间的角度来定位各个节点。

用视频检测方法进行定位不需要其他设备,且定位精确,因此是 AR 系统中最常见的定位方法。系统常通过匹配事先定义好的多种图形模板来标记各种物体和基准位置。简单的模板匹配不仅可以提高图像识别的效率,而且可以达到实时性的要求。视频检测中使用的标记一般由黑色封闭的矩形框和内部的各种图形或文字这两部分构成,其中黑色封闭的矩形框可以使程序在视频场景中快速识别是否存在标记,其内部的图形或文字可以表示标记的具体信息,如表示何种目标或在此应显示何种虚拟物体。这样当系统场景中的定位标记被识别后,根据图形的仿射不变性原理,就可以重建从预定义标记到当前场景中标记的坐标转移矩阵;然后系统就可以根据这个转移矩阵来绘制虚拟物体,并进行渲染。使用类似技术的系统包括华盛顿大学人机界面实验室的操纵虚拟物体的桌面系统<sup>[5]</sup>和 magic book<sup>[6]</sup>,以及维也纳科技大学基于掌上电脑的建筑物内部导航系统<sup>[7]</sup>等。现在许多桌面和室内 AR 应用系统都使用了标记定位,而且在工业应用中,使用标记定位的精度也可以达到实用要求。Echtler 等人在其设计的智能电焊系统中,就采用通过标记定位的 AR 系统来提供焊枪相对焊接位置的提示信息,并达到了 0.9mm 的精度<sup>[8]</sup>。由于标记定位方法的易用性,因此一部分研究者开始尝试设计一种广泛使用的、类似条码一样的标志系统来标记现实场景中的各种目标<sup>[9]</sup>。这样,在 AR 系统中使用价格低廉的 CCD 或 CMOS(complementary metal-oxide-semiconductor transistor)传感器就可以获得很高的定位精度,并且可以适应一些户外应用。

视频检测中还可以通过其他图像识别算法来跟踪定位,但是现有的大多数此类算法都只适合脱机工作,基于视频检测的定位系统的发展,在一定程度上也有赖于进一步提高图像处理算法性能的研究。法国雷恩大学的 Marchand 等人利用“虚拟视觉伺服算法”,就是通过不断修改一些已知特征的姿态和与视频中的特征相匹配来定位<sup>[10]</sup>。德国 Fraunhofer 计算机图形研究所的 Stricker 则使用参考图像代替

预定义的标记,并首先与视频流中的一帧在频域中匹配,然后通过计算两者扭曲和平移的程度推断出定位中使用的转移矩阵,他报告了使用这种算法在 P III 800Hz 的 PC 机上已达到每秒处理 10 帧,分辨率为  $320 \times 240$  的视频的速率<sup>[11]</sup>。

由于户外 AR 应用中定位的复杂性,还没有一种技术单独应用时可以达到完美的效果,因此在使用标记跟踪定位时,必须在近距离观察目标物体才能准确地识别标记。另外,环境光线的明暗变化、标记被遮挡或短暂地移出视野外的时候,都会导致系统清除虚拟物体。因此,实际应用中常常是综合使用各种跟踪定位技术构成的混合系统。美国哥伦比亚大学在第 1 个户外 AR 系统(the touring machine)<sup>[12]</sup>中,就是使用差分 GPS、倾角计和电子罗盘组成的混合跟踪定位系统来判断用户在校园中的位置、视野的方向和头盔的倾角。南澳洲大学在其一系列基于 Tinmith 框架的应用中,如 AR Quake 游戏<sup>[13]</sup>和户外交互试验<sup>[14]</sup>中也使用 GPS、电子罗盘和基于标记的视频检测相结合的方法,以保证在其中一种检测设备失灵的情况下仍能准确地定位。在对真实度要求较高的系统中,则常使用上述多种技术结合,最后应用视频检测的方法进行精确定位。

### 3.3 交互方法

在 AR 应用中,人们常常向往更自然的交互方法,但是在现实世界中与虚拟的信息交互是非常困难的,现在主要使用的方式有以下 3 种。

(1) 菜单 多用于掌上电脑的 AR 应用。

(2) 特殊标记 用于将特殊的标记固定在用于交互的设备上。

(3) 特制工具 一般外形简单,易于识别,并且通过按键可以触发一些系统事件。

Wagner 等人,在其基于掌上电脑的建筑物内导航系统中就使用菜单来选择出发地点和目的地<sup>[7]</sup>。这种使用特殊标记的方法仍然依靠视频检测进行模板匹配,它是将预先定义的容易识别的标志固定在交互物体上。这种方法最大优点是不需要繁琐的连线。如华盛顿大学的数字桌面系统中就使用贴有标记的木板来操纵虚拟物体,而系统在检测到木板与虚拟物体接触时则通过发出声响来使操作者产生真实接触的感觉<sup>[5]</sup>;文献<sup>[15]</sup>中使用装有反光标记的黑色手套来操纵虚拟的国际象棋棋子。在 Studierstube 项目<sup>[16]</sup>的许多应用中,则使用一种称为个人交互面板的工具(PIP)来与计算机生成的虚

拟物体交互。这个工具包含装有跟踪定位设备的一支笔和一个面板,面板可以作为虚拟物体的定位参考,同时应用系统也可以将虚拟的三维按钮等控制装置动态地叠加在面板上,使之成为一个真正的控制面板。另外一支笔则能够作为 6 维鼠标使用,用它可以精确地选择和操纵虚拟物体,同时,通过笔和面板接触能使操作者获得真实接触感。

在协作环境下进行交互是当前 AR 研究的一个热点,如 Reiner 等人演示了协作式 AR 环境下,可以多人参与的三维俄罗斯方块游戏<sup>[17]</sup>;Schmalstieg 等人演示了多个用户如何同时使用不同的交互工具来操作共享虚拟空间中的几何图形<sup>[18]</sup>。

## 4 开发工具与难点问题分析

现在已经有多种用于 AR 系统开发的工具包和 API (application programming interface),如 ARToolkit<sup>[19]</sup>、Coin3D<sup>[20]</sup>和 MR Platform<sup>[21]</sup>等,其中 ARToolkit 是一套开放源代码的工具包,它主要由日本大阪大学的 Hirokazu 博士开发,用于快速编写 AR 应用。ARToolkit 受到了华盛顿大学人机界面实验室和新西兰坎特伯雷大学人机界面实验室支持,已成为在 AR 领域使用最广泛的开发包。许多 AR 的应用都使用 ARToolkit 或在其基础上改进的版本来进行开发的。ARToolkit 采用基于标记的视频检测方法进行定位,其工具包中包含了摄像头校准和标记制作的工具,它支持将 Direct3D、OpenGL 图形和 vrmml 场景合并到视频流中(如图 3 所示),同时支持显示器和 S-HMD 等多种显示设备。

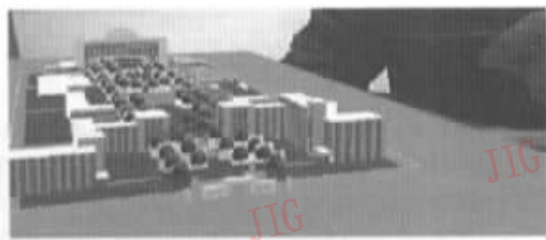


图 3 用 ARToolkit 合成的场景

MR Platform 由日本的混合实境实验室开发,其中包含了一个能减少人眼与头盔上摄像机之间平行度误差的 S-HMD 和一个运行于 Linux 环境下的用 C++ 语言开发的软件开发工具包(SDK)。这个工具包中提供了摄像机校正工具、视频捕捉、图像检测和操纵 6 自由度传感器等开发 AR 应用的基本功

能。

虽然经过了十几年的研究,开发了以上的许多种工具包,但是几乎所有 AR 系统仍然处于实验室内使用,研究者已经开始考虑 AR 在实用中面临的一些基本问题,主要有以下几个方面:

#### (1) 景物的生成与显示

几乎所有的 S-HMD 设备在明亮的环境下,其显示的效果都比较暗,另外,由于头戴式显示器上的摄像机的摄像角度与眼睛的位置存在偏差,因此虚拟物体的定位在真实视场中的定位和显示角度也会存在偏差,且很难调整。

#### (2) 定位错误

定位错误不可避免,民用 GPS 一般精度在 3m 到 12m 左右,在较差的天气中,最大误差可达 100m。电子罗盘也会因为附近的磁场干扰产生误差。由于现有许多户外的系统中的校正算法需要大量的输入和繁琐的校正步骤,因此不适合商业化应用。

#### (3) 通讯设备

多数系统都假设在带宽满足的情况下进行操作,但实际情况并非如此,在绝大多数分布式 AR 应用中,系统能力都要受制于数据传送的速度。因此在大型协作 AR 系统中,还有赖于通过动态兴趣度管理算法和动作预测算法来降低所需传输的数据量。

#### (4) 计算能力

在户外 AR 系统中,必须尽量减少客户端配置,数据处理常由便携式计算机,甚至是依靠掌上电脑来处理,因此,如何达到实时性和提高渲染效果是必须面对的一个问题。这也是目前 AR 研究中的热点之一。文献[22]将 ARToolkit 移植到 Pocked PC 上,并通过优化获得了 10~15 帧的速率。在另外一些研究中还利用分布式系统,以便尽量使计算移到远程服务器上<sup>[23,24]</sup>。

## 5 AR 应用的系统框架

为了推进 AR 的实际应用,除了对定位、交互和显示等基本技术进行研究外,还应提供一个开放式的开发与运行环境,以便于各个领域 AR 相关应用的开发,因此 AR 的系统框架的研究也是这个领域的一个重要内容。AR 应用可以被看作是一种场景相关的移动计算,但是移动计算中所讨论的框架并没有特别关注 AR 应用的一些要求,如定位设备的

处理和数据传输的低延迟等要求。为此,AR 领域的研究者相继提出一些适合 AR 应用、可重用的系统框架,用来支持 AR 应用系统的快速开发。这些框架包括 Studierstube、VRJuggler<sup>[25]</sup>、AMIRE<sup>[26]</sup> 和 DWARF<sup>[27]</sup>。其中 Studierstube 与 DWARF 都提供了很强的面向对象(程序和场景)的方法来支持 AR 应用的开发。下面主要来介绍这两种框架。

### 5.1 Studierstube 框架

Studierstube 开发环境由一套建立在 OIV (open inventor toolkit)库<sup>[28]</sup>基础上的采用 C++ 语言编写的类库构成。其中 DIV (distributed open inventor)是在 OIV 基础上开发的一套工具包,它利用 OIV 的通知机制,用于支持分布式 AR 系统环境。DIV 构成了 Studierstube 软件框架的核心。它为开发者提供了一套便利的编程模型。在这个模型中,应用程序被编写成独立的对象,然后和图形一起被嵌入到图形场景(scene graph)中,这就使应用程序可以作为二进制对象在系统运行时动态调入。当用户登录系统后,客户端即得到一份图形场景的拷贝,由于应用程序也嵌入在图形场景中,所以也可以被传送到客户端,这样系统就可以实现分布式的计算。

Studierstube 框架中使用了称为 OpenTracker 的库<sup>[29]</sup>来专门处理跟踪定位过程,OpenTracker 把处理跟踪定位设备数据的过程分解为许多步骤,以构成一个处理网络。这些操作包括从设备读取数据、传递数据到相应的应用程序或主机。这个网络可通过系统启动时读取 XML (extensible markup language)文件来进行配置,并通过网络中的节点来处理各个步骤的操作,如 source 节点提供 GPS、电子罗盘等传感器和外设的驱动,filter 节点提供数据转换, sink 节点将转换数据提供给相应主机上的应用程序等。

文献[30]展示了一个基于 Studierstube 框架的多用户应用系统的结构(如图 4 所示)。它是一个采用 Client-server 构架的开放式系统,其是应用 AVS-DynSys3D 软件作为处理三维科学数据的引擎。为了提高处理速度,定位数据的处理和场景处理各自采用独立的服务器,客户端只保留场景的一个备份,当任意用户修改虚拟物体时,都会触发系统消息送给场景服务器,而场景服务器则立即将数据进行格式转化后送给 AVS-DynSys3D 软件处理,当获得结果后,场景服务器则又将转换格式后的数据通过广播的方式送给各个客户端。

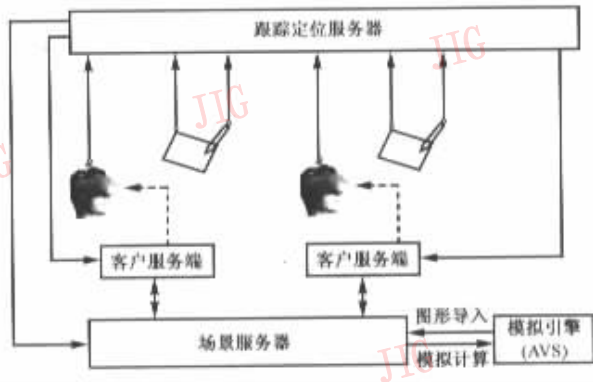


图4 一个基于 Sdierstube 框架的多用户系统结构

## 5.2 DWARF 框架

DWARF 框架的最基本的组成单元是分布式的服务模块。AR 系统的各种功能,如跟踪定位、三维渲染、模态输入输出都由各种服务(service)来完成。这些服务运行在通过网络互连的台式机或者是移动电脑上,可以随时添加或更改。服务与它们支持的硬件可以成组绑定,例如 S-HMD 和笔记本电脑上运行的渲染服务绑定在一起,以及手持电脑与菜单界面服务绑定。DWARF 采用基于 CORBA (common object request broker architecture) 中间件来管理系统中运行的服务,称为服务管理器。该系统在每个网络节点上都运行着一个服务管理器来控制本地的服务,而服务通信则使用 CORBA 协议进行通讯,并通过服务管理器之间的协作来建立连接和进行相互调用。这样利用服务之间的松散耦合关系,在 DWARF 构架中就能方便的建立分布式地 AR 应用。

Studierstube 与 DWARF 各具优势,且它们都可以方便地添加新的功能组件。Bauer 等人尝试编写一个组件将两者结合起来,不仅减少了开发驱动程序的工作量,而且有助于开发大型的普及计算环境下的 AR 应用<sup>[31]</sup>。

## 6 典型应用

### 6.1 AR 化学试验

Augmented Chemistry (AC)<sup>[32]</sup> 是利用增强现实技术的一套化学分子式辅助教学系统。在这个系统中,化学元素分别由不同标记代表,使用者将标记卡片放到桌面时,系统就会将相应元素的原子模型显示在相应的卡片之上(如图5所示)。在该系统中, S-HMD 并不是必须的设备,用户可以通过投影屏或显示器进行观察。在使用中,可以通过交互工具选

取不同的原子到另一种标记卡片上组合成分子,然后系统就会在相应位置动态显示出此分子式的名称和三维的分子式结构。

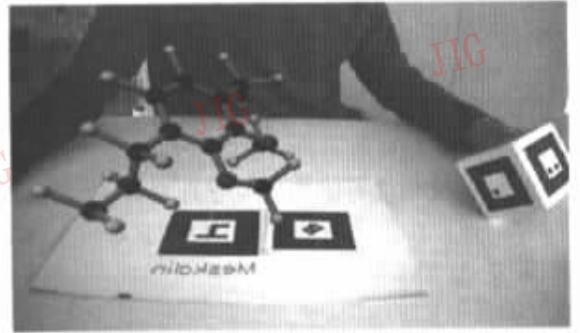


图5 AC中合成的分子式(Benedikt 授权)

AC 系统利用 ARToolkit 工具包在 Linux 系统上开发。由于其内置数据库中存储的分子式结构及与之相关的描述信息可以根据需要随时添加,也可以绑定声音信息作为提示和介绍,因此有很强的扩展性。

### 6.2 基于 AR 的文化遗迹浏览系统

基于 AR 的文化遗迹浏览系统(ARCHEOGUIDE)<sup>[33]</sup> 是欧盟一些组织与希腊文化部共同建设的通过 AR 技术复原古迹的一个系统,这个系统由信息服务器及创作工具、无线网络和 AR 客户端组成(如图6所示)。网络用户在户外遗迹所在的位置通过 AR 客户端动态连接到服务器,即可取得所在位置的遗迹信息,然后通过与客户端电脑连接的 S-HMD,即可在相应的位置看到遗迹复原的效果(如图7所示)。这个系统将在 2004 年希腊奥运期间

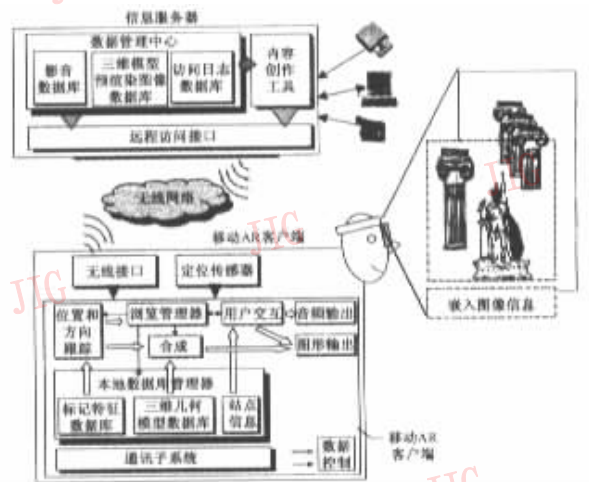


图6 ARCHEOGUIDE 系统结构

开始试运行。



图 7 Archeoguide 效果示例(Nikos Ioannidis 授权)

## 7 结束语

AR 系统目前的应用虽然仍处于实验室研究阶段,但是作为一个涉及到多种学科交叉的研究领域,诸多领域的研究成果都可以促使 AR 研究与应用的飞速发展,因此这也会吸引愈来愈多研究人员投入到这个领域的研究中。相信不久的将来,AR 会在导航、设计、娱乐等领域广泛应用,这将使人们和计算机之间能够更加自然和有效的交互。

### 参 考 文 献

- Tom caudell. AR at boeing (1990) [EB/OL]. <http://www.ipo.tue.nl/homepages/mrauterb/presentations/HCI-history/tlsd096.htm>.
- Boeing Inc. Augmented reality [EB/OL]. <http://www.boeing.com/defense-space/aerospace/training/instruct/augmented.htm>.
- Azuma R. Survey of augmented reality[J]. *Teleoperators and Virtual Environments*, 1997, 6(4):355~385.
- Microvision inc. Nomad augmented vision system [EB/OL]. <http://www.microvision.com/nomad/index.html>.
- Kato H, Billinghurst M, Poupyrev I, *et al.* Virtual object manipulation of a table-top AR environment[A]. In: Proceedings of International Symposium on Augmented Reality 2000 (ISAR 00)[C], Los Alamitos, CA, USA, 2000:111~119.
- Billinghurst M, Kato H, Billinghurst M, *et al.* The MagicBook: Moving seamlessly between reality and virtuality [J]. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 2001, 21(3):2~4.
- Daniel Wagner. First steps towards handheld augmented reality [A]. In: Proceedings of the 7th International Conference on Wearable Computers[C], White Plains, NY, USA, 2003.
- Echtler F, Sturm F, Kindermann K, *et al.* The intelligent welding gun: augmented reality for experimental vehicle construction, chapter 17 in virtual and augmented reality applications in manufacturing [M]. Heidelberg, Germany:

Springer Verlag, 2003.

- Rekimoto J, Ayatsuka Y. CyberCode: Designing augmented reality environments with visual tags [A]. In: Proceedings Conference of Designing Augmented Reality Environments[C], Elsinore, Denmark, April 2000.
- Marchand E, Chaumette F. Virtual visual servoing: A framework for real-time augmented reality[A]. In: Proceedings of EUROGRAPHICS Conference[C], Saarebrücken, Germany, 2002:289~298.
- Didier Stricker. Tracking with reference images: A real-time and markerless tracking solution for out-door augmented reality applications[A]. In: Virtual Reality, Archaeology, and Cultural Heritage International Symposium (VAST01)[C], Glyfada, Nr Athens, Greece, November, 2001:28~30.
- Feiner S, MacIntyre B, Hollerer T, *et al.* A touring machine: Prototyping 3D mobile augmented reality systems for exploring the urban environment [A]. In: Proceedings of International Symposium on Wearable Computers[C], Cambridge, UK, 1997: 74~81.
- Thomas B, Close B, Donoghue J, *et al.* ARQuake: An outdoor/indoor augmented reality first person application [A]. In: Proceedings of 4th International Symposium on Wearable Computers[C], Atlanta, Georgia, USA, 2000.
- Piekarski W, Thomas B. H. Unifying augmented reality and virtual reality user interfaces[R]. Technical Report, School of Computer and Information Science, University of South Australia, Jan, 2002.
- Dorfmueller-Ulhaas K, Schmalstieg D. Finger tracking for interaction in augmented environments[A]. In: Proceedings of the 2nd ACM/IEEE International Symposium on Augmented Reality (ISAR'01)[C], New York, USA, 2001:29~30.
- Schmalstieg D, Fuhrmann A, Hesina G, *et al.* The studierstube augmented reality project [J]. *Teleoperators and Virtual Environments*, 2002, 11 (1): 33~54.
- Wichert R. Collaborative gaming in a mobile augmented reality environment[A]. In: EUROGRAPHICS-Ibero-American Symposium in Computer Graphics-SIACG [C], Guimares, Portugal, 2002:31~37.
- Schmalstieg D, Fuhrmann A, Hesina G. Bridging multiple user interface dimensions with augmented reality [A]. In: Proceedings of International Symposium on Augmented Reality [C], Munich, Germany, 2000:20~29.
- Kato H. ARToolkit [CP/OL]. <http://www.hitl.washington.edu/projects/artoolkit/>.
- SIM corporate. Coin3D[CP/OL]. <http://www.coin3d.org>.
- Uchiyama S, Takemoto K, Satoh K, *et al.* MR platform: A basic body on which mixed reality [A]. In: Proceedings of International Symposium on Mixed and Augmented Reality[C], Darmstadt, Germany, 2002:246~320.
- Wagner D, Schmalstieg D. ARToolKit on the PocketPC platform[A]. In: IEEE International Augmented Reality Toolkit

Workshop[C], Darmstadt, Germany, 2003.

- 23 Wagner M. Building wide-area applications with the AR toolkit [A]. In: IEEE International Augmented Reality Toolkit Workshop[C], Darmstadt, Germany, Sept. 29, 2002.
- 24 Behringer R, Tam C, McGee J, *et al.* A wearable augmented reality testbed for navigation and control, built solely with commercial-off-the-shelf (COTS) hardware[A]. In: Proceedings of International Symposium on Augmented Reality[C], Munich, Germany 2000:12~19.
- 25 Cruz-Neira C. VRJuggler[CP/OL], <http://www.vrjuggler.org>
- 26 Dorner R, Geiger C, Haller M, *et al.* Authoring mixed reality-a component and framework-based approach[A]. In: International Workshop on Entertainment Computing-Special Session on Mixed Reality Entertainment Computing[C], Makuhari, Japan, 2002.
- 27 Martin B, Bernd B, Gudrun K, *et al.* Design of a component-based augmented reality framework [A]. In: Proceedings of International Symposium on Augmented Reality(ISAR)[C], New York, USA, 2001.
- 28 Silicon Graphics Inc. Open inventer toolkit [CP/OL], <http://www.sgi.com/software/inventor/>.
- 29 Reitmayr G, Schmalstieg D. OpenTracker: An open software architecture for reconfigurable tracking based on XML[A]. In: Proceedings of the ACM Symposium on Virtual Reality Software & Technology(VRST)[C], Seoul, Korea, 2001:47~54.
- 30 Szalavari Z, Schmalstieg D, Fuhrmann A, *et al.* Studierstube: An environment for collaboration in augmented reality [J]. Virtual Reality, 1998,3(1):37~48.
- 31 Bauer M, Hilinges O, MacWilliams A, *et al.* Integrating studierstube and DWARF [A]. In: International Workshop on Software Technology for Augmented Reality Systems [C], Tokyo, Japan, Oct. 7, 2003.

32 Fjeld M, Benedikt M V. Augmented chemistry: An interactive educational workbench [A]. In: Proceedings of International Symposium on Mixed and Augmented Reality[C], Darmstadt, Germany, 2002:259~260.

33 Vlahakis V, Ioannidis N, Karigiannis J, *et al.* Virtual reality and information technology for archaeological site promotion [A]. In: 5th International Conference on Business Information Systems(BIS02)[C], Poznan, Poland, April, 2002:24~25.



朱森良 1946年生,浙江大学教授,博士生导师。中国人工智能学会常任理事、智能机器人学会副理事长,IEEE计算机协会会员。曾主持国家自然科学基金、863高技术计划及国家级重大攻关项目12项。主要研究领域为计算机视觉、人工智能、网络多媒体。

E-mail:zhum@zju.edu.cn



姚远 1978年生,2003年获西安工程科技学院机械工程硕士学位,现为浙江大学计算机学院博士研究生,主要研究方向为增强实境系统的设计与应用。

E-mail:yao\_yuang@zju.edu.cn



蒋云良 1967年生,浙江大学计算机学院博士研究生,湖州师范学院信息工程学院副院长,副教授。主要研究方向为人工智能、数据融合、多媒体信息处理等。