

实物界面下的虚拟装配

喻晓宇^{1),2)} 张凤军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 100190)

摘要 基于增强现实技术,将实物用户界面应用到虚拟装配系统中,在单摄像头的条件下,将虚拟零件模型加载至实物标记上,用户通过操作实物标记来控制虚拟模型,完成装配过程。相比于传统的虚拟装配交互方式,增强了用户操作的切实感。根据装配任务需求设计了4类实物标记。提出了3种交互技术,包括接近性原理,匹配约束信息提示与判定,以及视点控制等,并且结合碰撞检测来实现精确而又自然的虚拟装配。该系统可以帮助设计人员方便地对产品设计进行分析和改进,降低用户的学习难度。

关键词 实物界面 虚拟装配 约束 接近性原理 视点控制

中图法分类号: TP391.9 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2010)08-1151-07

Virtual Assembly in Tangible User Interface

YU Xiaoyu^{1),2)}, ZHANG Fengjun¹⁾, DAI Guozhong¹⁾

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

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

Abstract Based on Augmented Reality, we developed a virtual assembly system using Tangible User Interface. In the condition of single camera, it connects real markers and virtual models of the components. Users control the virtual models by manipulating tangible markers to accomplish the assembly procedure. Compared to traditional virtual assembly, it improved the sense of reality during the operation. We designed four kinds of markers according to the demands of the assembly task. Three interaction techniques, including proximity, constraint information judgment and view control are proposed. Besides, we also used collision detection to realize accurate and natural virtual assembly. The system can help designers analyse and improve products, and it's also easier for users to learn.

Keywords tangible user interface, virtual assembly, constraint, proximity, view control

0 引言

虚拟装配是在产品设计过程中,为了更好地帮助设计者进行与装配有关的设计决策,在虚拟环境下对计算机数据模型进行装配关系分析的一项计算机辅助设计技术。在交互式虚拟装配环境中,用户使用各类交互设备(数据手套/位置跟踪器、鼠标/

键盘、力反馈操作设备等),像在真实环境中一样对产品的零部件进行各类装配操作,在操作过程中系统提供实时的碰撞检测、装配约束处理、装配路径与序列处理等功能,从而使得用户能够对产品的可装配性进行分析,对产品零部件装配序列进行验证和规划,对装配操作人员进行培训等,使生产真正在高效、高质量、短时间、低成本的环境下完成。传统的虚拟装配通常是在 CAD(计算机辅助设计)软件中

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973)项目(2009CB320804);国家自然科学基金项目(60673188, U0735004);国家高技术研究发展计划(863)项目(2009AA01Z337)

收稿日期:2010-03-18; **改回日期:**2010-04-21

第一作者简介:喻晓宇(1985—),男。现为中国科学院软件所人机交互实验室计算机应用技术专业硕士研究生。主要研究方向为增强现实。E-mail: xyxyxytop@yeah.net

实现的,用户通过鼠标键盘来与计算机交互,操作零件的装配。这是基于 GUI(graphical user interface)的 2D 交互,在这种交互方式中,用户操作的自由度受到了一定限制,交互并不自然。而另一种比较常见的交互方式是采用数据手套与跟踪器结合,即使使用虚拟手的装配。虚拟手为用户提供了灵活的自由度控制,但是缺乏切实感,用户对零件的抓取以及操作都是完全虚拟的,在操作时缺乏深度感知,而且手长时间保持特定姿势也容易产生疲劳。

而不同于 2D GUI,实物用户界面(TUI)则实现了输入与输出设备的统一。Ishii 等人在 CHI1977 的会议上^[1]首次将 TUI 定义为直接将人们在现实生活中和物体、环境的交互动作映射为与信息空间的交互过程的用户界面。在实物用户界面中,用户所操作的输入设备与他们获取信息的输入设备不再像传统的键盘、鼠标与显示器这样分离开来,而是通过增强现实等技术将他们有机地结合起来,二者得到了很好的统一。本文利用实物用户界面的思想,将视频标记的物理实物作为虚拟零件的物理化身,用户通过操作视频标记,调整其方向、位置来实现装配过程,在一定程度上提供了深度线索,增强了装配的切实感。

近些年来,增强现实技术的应用越来越广泛,例如 Lee 等人基于增强现实技术开发了一个计算机辅助教学系统^[2],Irawati 等人开发的 VARU 框架^[3]是一个基于增强现实技术的房间规划系统,可以通过对虚拟家具的摆放来调节房间布局。Billinghurst 等人开发的 Magicbook 系统^[4]可以让用户在阅读书籍时,在真实纸张之上看到虚拟的 3D 模型。而基于增强现实技术的虚拟装配也成为了一项研究热点,Sidharta 等人开发的 ATI 系统^[5]是一个分布式的虚拟装配系统,身处不同地点的零件开发设计人员在召开网上会议,对零件的设计进行分析讨论时,可以让其中某个与会成员通过增强现实技术展示零件的外观,并进行选取、装配等操作,而此时其他与会成员可以在本地机的显示器上以虚拟现实的方式浏览到所演示的过程。系统的装配环节实际在一定程度上是基于实物用户界面来实现的,并且通过分布式技术能将任何一个人的演示过程呈现给其他人,但是该系统对于零件本身的装配过程实现的比较简单,操作人员是通过语音命令来对零件的选取、装配等动作进行控制,在装配时只要发出“装配”的语音命令,零件就会被安装到指定的位置,用户并不能看

到零件被安装上的全过程,也无从判断该过程是否正确合理。并且语音命令只能实现比较简单的控制操作功能,对于比较灵活、复杂的操作则显得力不从心。

彭涛等人开发的虚实融合的装配系统^[6]通过计算机视觉技术与坐标变换将真实零件和虚拟零件统一在一个世界坐标系中,可以将虚拟零件装配到真实零件上。而用户对于虚拟零件的操作是通过数据手套与跟踪器来实现的,这样用户抓取零件时没有真实的触觉感知,在操作零件的过程中很难对零件进行灵活的姿态调整,在交互的自然程度上有一定的欠缺。

我们所开发的基于实物界面的虚拟装配系统(TVAS),通过增强现实技术将虚拟的零件与现实世界中的实物标记建立联系,零件附着在印有标记的纸卡上面,用户操作手持标记进行零件的选取、角度调整以及装配等操作,在装配过程中,根据匹配关系和约束关系给用户相应的提示信息,并通过碰撞检测技术判断零件是否能够正确装配。

1 交互任务分析与标记设计

通常的虚拟装配任务,其装配过程如下:初始状态下,所有零件都散列在工作台上,用户依次取用零件,并通过直接操作,将待定位的零件放置到相对于基准零件的指定位置。在这一过程中,要根据约束匹配条件确定装配是否适合,同时通过碰撞检测确定在装配过程中与其他零件或装配体是否有干涉。在该过程中,用户需要进行的交互任务包括:

- 1) 选择基准零件并放置到工作空间;
- 2) 从散列的待装配零件中选取特定零件;
- 3) 调整待装配零件的空间位置与方向,使其与基准零件相匹配,在该过程中,要进行运动路径的碰撞检测和装配约束的匹配。

在 TVAS 中,装配过程中零件的选取和后续的操作过程都是通过视频标记来实现的,如图 1 所示,用户不再是通过操纵 2D 交互设备或使用带有跟踪器的数据手套来实现这一过程,而是在摄像头视角下的 3 维空间内进行装配,这涉及到如何使用真实标记来表达待装配零件、基准零件和装配工作区域,以及待装配零件的选取与操作、用户视点控制等问题。

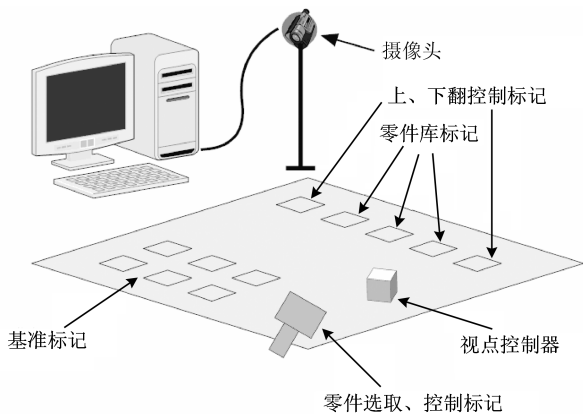


图 1 TVAS 系统工作环境
Fig.1 TVAS working environment

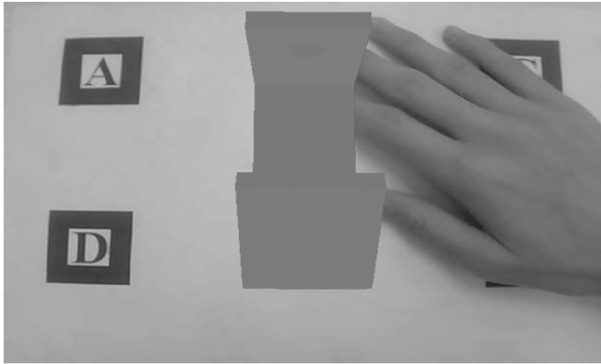


图 2 部分遮挡基准矩阵并不影响基准零件的显示
Fig.2 Covering part of the marker doesn't effect the display of the base component

1.1 待装配零件与标记的关联

在虚拟装配任务中,首先各零件处于分离状态,需要利用 ARtoolkit 在不同的零件与标记之间建立关联,形成零件库,供用户浏览和取用。为了将所有零件清晰地呈现给用户,同时又能让用户方便地取用所需零件,TVAS 中的虚拟零件库采用胶片隐喻的方式实现。

零件库类似于 2D WIMP (window/icon/menu/pointing device) 中的滚卷条^[7],即在纸上打印一列标记,在列的头和尾设置上翻和下翻标记,中间的标记与零件库中的零件模型建立动态连接。此外,零件库中,与基准零件有匹配关系的零件,需要以高亮显示的方式给出提示,以便于用户从零件库中选择合适的零件进行装配。

1.2 装配工作区与基准零件

在装配的起始阶段,用户要先从零件库中选取一个基础零件作为装配基准,并将其摆放到用于承载基准零件的指定标记上,此后的装配过程,所有的零件以及子装配体都要按一定顺序安装到基准零件上,直至装配完成。

装配基准采用一个 2×3 的标记矩阵来与之相关联。由于在装配过程中,手持标记很可能会对基准标记产生遮挡,如果使用单一标记来表示装配基准,那么一旦此标记被遮挡,整个装备基准就会由于摄像头检测不到有效的关联标记而消失,导致装配无法正常进行,而用 2×3 的标记矩阵,只要该矩阵中有 1 个标记能被摄像头成功地跟踪检测到,那么装配基准就能够被正确的加载,如图 2 所示,这样就能使用户遮挡造成的影响降到最低。

为了完成基础零件的摆放过程,用户需要用加载了基准零件的手持标记去接近基准标记矩阵,并且倾斜手持标记至一定角度,零件会被加载至标记上,并同时从手持标记上以及零件库中移除。

1.3 零件的选取与操作

在 TVAS 系统中,对所有零件的取用、位置调整以及装配操作都是通过手持标记来完成的,当用户从零件库中选定一个零件,并通过手持标记接近该零件所在标记时,利用接近性原理,所选零件就会被复制到手持标记上。加载零件时,要利用托盘隐喻,将所取零件调整至合适的姿态,使其装配位置暴露于侧面或上方等易于操作装配的方向上。用户可以操作该标记与装配基准中的零件进行装配,如果装配成功,零件会从手持标记上以及零件库中移除,用户可以继续从零件库中选取零件进行装配,而如果装配失败或者用户需要重新选取其他零件,可以直接通过使用手持标记接近零件库中的其他零件进行重新选取。

1.4 视点控制与浏览

在以往使用数据手套和跟踪器实现的虚拟装配中,用户只能对所持零件进行简单的姿态调整,既不能进行灵活的视点调整,也无法对特定零件进行细节查看。此外,由于数据手套加跟踪器的设备配置比较笨重,在操作中也会带来诸多不便。而在实物界面中,用户可以直接通过实物标记对零件进行方便地操作。此外,对于某些较复杂的零件,在装配过程中可能需要对其局部进行放大以便于进行观察和装配,这时便需要一类能够用于控制零件等比例缩放的标记。在 TVAS 中,基础零件的缩放以及视点控制是通过操作 Cube 来完成的,如图 3 所示,一个

Cube 是在 6 个面上印有 6 个不同标记的正方体,不同的标记用于实现不同的视点控制功能,例如等比例缩放、平移、旋转等。



图 3 视点控制器
Fig.3 View controller

2 交互技术

在 TVAS 中,对零件的操作是通过操作实物标记进行的,这涉及交互技术的 3 类问题:操作状态的切换、用户视点控制以及约束导航装配。

2.1 操作状态切换机制

由于 TVAS 系统的交互是通过对视频标记的跟踪实现的,因此没有类似 GUI 中的精确按钮来切换不同的状态。这类操作是通过空间接近和时间延迟,以及遮挡来实现的。

取用零件的操作是通过空间接近来实现的,当用户手持标记时,根据坐标变换,计算手持标记在零件库标记坐标系中相对于每个零件库标记的距离,如果距离小于设定的阈值,则认为用户需要取用该零件,将零件库中的对应零件加载到手持标记上。在计算两个标记之间的距离时,由于摄像头固定在标记正上方,且用户在取用零件时通常是在水平面内进行标记的移动,因此忽略掉竖直方向的坐标分量 z ,只考虑水平距离 $d = \sqrt{(x - x')^2 + (y - y')^2}$,并判断 d 是否小于所设定的阈值即可。另外为了减少误操作,要加入延时策略,用户手持标记接近特定零件库标记一段时间才激活加载零件的操作。通过反复测试,将延时时间设为 0.5 s,这样可以在不影响用户操作实时性的前提下,有效地减少误操作。

零件库如前所述,采用胶片隐喻的方式呈现,两

端的标记用来实现上翻和下翻操作,通过单手遮挡某标记再露出的过程,来模仿传统 2D WIMP 中滚动条的上下箭头按钮。翻页控制过程如图 4 所示。

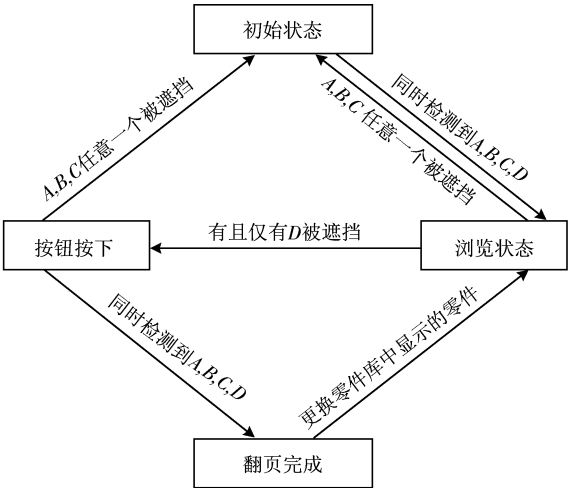


图 4 单手遮挡控制的状态转换图
Fig.4 State transformation of covering control

假设 A,B,C 是用来表示零件库的 3 个标记, D 是当前用来操作实现遮挡控制功能的标记。首先零件库处于初始状态,当同时检测到零件库标记 A,B,C 与按钮标记 D 时,进入浏览状态,此时若仅有按钮标记被遮挡,则进入按钮按下状态,之后如果再次检测到按钮标记出现,则认为按钮抬起,完成翻页操作,切换零件库中零件,并且回到浏览状态。在任何状态下,如果 A,B,C 中有任意一个标记被遮挡,则认为零件库离开了摄像头视域,回到初始状态。该状态转换过程的设计主要是为了防止如零件库标记进出摄像头视野等过程被误识为翻页操作的情况,实际翻页操作过程与常见的按下按钮的操作相同,如图 5 所示。

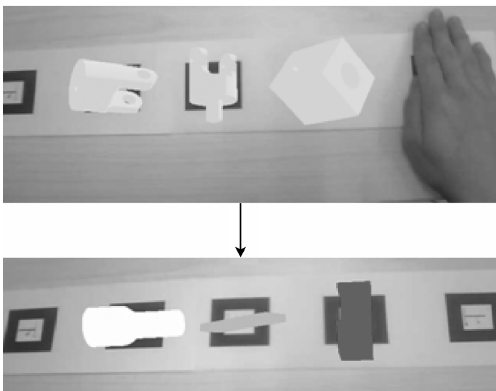


图 5 使用单手遮挡操作实现零件库上翻
Fig.5 Flipping the component library by covering control

此外,在某些装配任务中,要先对某两个或几个零件进行一次装配形成子装配体,再将该子装配体作为一个整体与装配基准进行装配。为了完成子装配过程,需要先对装配基准进行切换。通过用单手遮挡切换标记,实现装配基准的切换,系统会将原先的装配基准保存起来,而切换到一个空白的平台,用户利用前述的方法选择并摆放新的基准零件,之后可以取用其他零件向新的装配基准上进行装配。待子装配过程结束后,用户再次通过接近性原理,将装配好的子装配体加载到手持标记上,然后切换回原有的装配基准,进行整体的装配。

2.2 匹配及约束信息提示

几何约束作为机械装配设计中描述装配关系的重要方法,在虚拟装配人机交互过程中可成为实现精确直接操作所必需的交互辅助手段^[5]。为了完成零件的精确定位以及装配,约束信息的提示以及判定是必不可少的。在 TVAS 系统中,当用户从零件库中选择零件时,与装配基准中存在装配关系的零件会以高亮颜色进行提示,而用户通过手持标记取出相应零件之后,该零件与装配基准中对应装配位置的约束关系也要以比较直观的形式给出提示,例如对应贴合面的高亮显示,或者同轴关系的轴显示等,以此来引导用户按照正确的顺序、方法进行装配。用户在装配过程中,根据匹配类型的不同,如果满足对应的约束判定条件,则由系统接管装配过程,自动完成最终的精确装配。常见的匹配关系分为以下几类:

- 1) 共面 两个零件的某个面重合,判定时需要确定两个平面的法向向量以及平面上一点;
- 2) 共轴 两个圆柱体共轴,判定时需要确定两个轴向向量以及轴上一点,以及柱体半径;
- 3) 相切 一个柱体与一平面相切,判定时需要确定平面的法向向量以及该平面上一点,柱体的轴向向量以及轴上一点和半径;
- 4) 平行 两个平面平行,判定时需要确定两个平面的法向向量和各自平面上一点。

用于保存匹配约束信息的数据结构如下:

```
struct MateEnt
{
    int mateEntType; //匹配体类型
    int VRA_ID;      //匹配体 ID
    int face_ID;     //匹配面 ID
    Point point;     //约束条件中的点坐标
```

```
Vec vec;           //约束条件中的向量
Radius radius;     //约束条件中的半径
};
struct Mate
{
    int mateID;      //匹配关系 ID
    MateEnt m1;      //匹配体 1
    MateEnt m2;      //匹配体 2
};
```

对于以上每种约束条件,要设定对应的判定条件。设 θ 是两向量之间的夹角, d_p 是对应点之间的距离, d_s 是点到平面之间的距离, α 以及 d' 是设定的阈值。每种约束条件的判定条件如下:

- 1) 共面或平行 $\pi - \theta < \alpha$ 且 $d_s < d'$;
- 2) 共轴 $\theta < \alpha$ 或 $\pi - \alpha < \theta$ 且 $d_p < d'$;
- 3) 相切 $\left| \theta - \frac{\pi}{2} \right| < \alpha$ 且 $d_p < d'$ 。

用户操作零件装配时,先将手持标记上模型的坐标从该标记的坐标系转换到装配基准坐标系中,然后再根据以上判定条件对不同的约束进行判定,只要满足相应的判定条件,则由系统接管,自动完成该零件的精确装配。

2.3 视点变换与细节查看

对于比较复杂的零件,或是需要装配两个体积相差较悬殊的零件时,若在相同的比例空间中显示两个完整的零件,那么势必会造成其中一个零件过小,或是用户很难清楚地观察到零件细节,使用户在观察以及精确操作零件的过程中遇到较大困难,因此需要提供零件的等比例缩放与视角调整等功能。为此引入 Cube 作为视点角控制器。用户需要进行视角调整时,手持 Cube,将 Cube 不同面的单个标记呈现在摄像头视域中,便可实现不同的控制功能,例如放大、缩小、平移等,在放大与缩小时,手持标记上的零件也会随之等比例地放大与缩小,以保证装配过程的正常进行,状态转换过程如图 6 所示。为了提高控制精度,在 Cube 交互中还要引入延时策略,

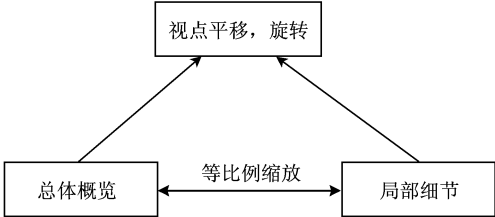


图 6 零件的细节查看状态转换
Fig. 6 State transformation of detail checking

Cube 的任何一个面都要呈现 0.5 s 之后才会实现控制功能,以排除操作过程中的各种干扰影响。

3 系统结构与应用

3.1 系统配置

在理想条件下,TVAS 系统的用户应佩戴头戴式显示器(HMD)作为显示设备来进行装配操作,但由于 HMD 价格比较昂贵,且不易使用和维护^[8],因此暂时使用摄像头和显示器来代替 HMD,通过摄像头来获取真实世界中的信息,由 TVAS 系统进行图像的跟踪、检测、识别等操作,并将相应的虚拟零件加载在真实标记图像之上。用户最终将在显示器上看到虚实结合的影像,同时操作实物标记来完成零件的选取及装配等操作。

系统使用的标记是印有黑色方框的方形标记,以黑色方框内的字符作为区分不同标记的标志,不同的标记可以附着在硬纸板、正方体或手持标记等物体上以便于用户进行手持操作。

在软件方面,系统主要使用 OSG (open scene graph) 以及 ARtoolkit 两个开源软件包,其中 OSG 主要用于虚拟零件模型的绘制,而 ARtoolkit 则主要用于跟踪检测实物标记并将相应的虚拟零件模型加载其上,此外,还要使用 RAPID 开源包来完成装配过程中的碰撞检测工作。

3.2 系统流程

TVAS 系统流程如图 7 所示。

首先将 CAD 系统导出的零件数据读入,对每个零件建立几何模型,并且针对每个零件,根据读入的匹配约束信息,建立其匹配信息链表,链表中保存所有与该零件有匹配关系的零件编号以及具体的约束条件。然后再建立一个零件库整体链表,该链表的每个节点对应一个零件,其结点数据包含两部分,一部分是对应零件的几何模型,另一部分是此零件的匹配约束信息链表,其数据结构如图 8 所示。

初始状态下,零件库链表包含了所有待装配的零件,每次从零件库中取出 3 个零件的面片几何模型,通过 Artoolkit 绑定到对应的零件库标记上。用户首先要从零件库中选定一个基础零件作为装配基准,通过操作手持标记,利用接近性原理将该零件取出,并通过接近工作台标记及倾斜手持标记将零件放置到工作台标记上构成装配基准。随后用前述同样的方法从零件库中取出零件进行装配。用户每次

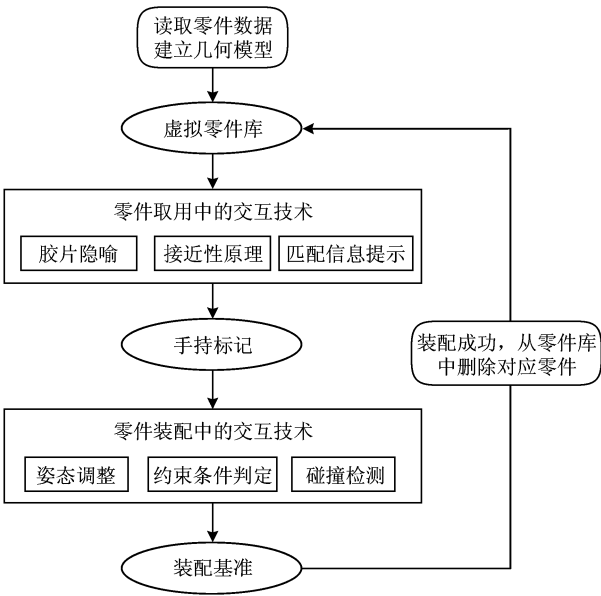


图 7 TVAS 系统流程图
Fig. 7 System process of TVAS

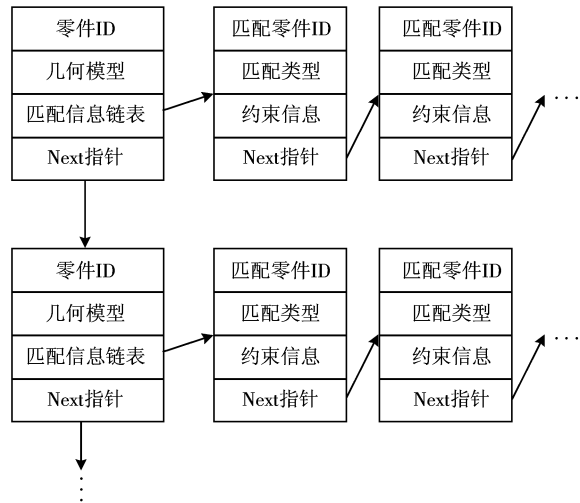


图 8 零件库链表数据结构
Fig. 8 Data structure of library list

取出一个零件,系统会搜索其匹配信息链表,查找与其匹配的零件是否出现在装配基准零件中,若有,则根据约束信息,同时在所取零件以及基准零件中的对应位置给出显示的约束提示。对于装配基准,也维护一个和零件库类似的链表,第一次基准零件摆放成功,或者之后每次一个零件装配成功,系统就会将该零件对应的节点元素从零件库链表中移出,加入到基准零件链表中。而在用户浏览零件库时,系统也会遍历当前零件库所显示的所有零件的匹配关系链表,凡是与装配基准有匹配关系的零件,都会在

零件库中以高亮方式显示,明确地表示出当前有哪些零件可以取用。

在装配过程中,需要对相关的零件模型进行碰撞检测,在 TVAS 系统中,碰撞检测是通过 RAPID 开源接口来完成的,RAPID 可以比较方便地用于检测模型之间的碰撞。首先要建立两个待检测的 RAPID 模型,先将用户手持标记上的模型以三角形面为单位,依次加入到所建立的 RAPID 模型中,每个三角形面,通过三角形的 3 个顶点相对于手持标记坐标系的坐标来表示,然后以同样的方式,将装配基准中的所有零件模型加入到另一个 RAPID 模型当中,此时两个模型的顶点坐标数据都是相对于各自标记坐标系的,在进行碰撞检测时,需要分别给出从两个标记坐标系变换到摄像头坐标系的旋转矩阵以及平移向量,作为 RAPID 碰撞检测接口的输入参数,根据得到的结果,如果在装配过程中发生碰撞,则系统会以声音和颜色的变化来提示用户,用户必须将手持标记与基准零件完全分离以重新开始装配,否则装配过程无法继续。

3.3 系统评估

为了检验 TVAS 的实际应用效果,请了 15 名用户来进行了非正式的系统评估,让这 15 名用户使用 TVAS 系统完成指定的装配任务,并对系统的操作准确性、易用性以及交互自然程度几方面进行评价。结果显示,TVAS 系统在操作准确性上满意度略低,大约有 46.7% 的用户认为该系统操作准确性不如传统的 WIMP 界面,但是在易用性和交互自然程度上,分别有 80% 和 86.7% 的用户表示满意。接下来还将展开更加细致和正式的用户评估工作。

4 结 论

通过增强现实技术,将实物用户界面技术应用在了虚拟装配系统上,避免了传统装配过程中输入与输出分离的弊端,用户直接用双手操作真实标记物体,相对于使用数据手套等虚拟方式,用户在装配过程中有实际触觉感受,能得到更加真实的装配体验,装配过程更加自然流畅。

此外,根据虚拟装配过程中的具体用户需求,TVAS 系统设计了几类具有不同语义信息的标记,并结合接近性原理、视点变换等交互技术,降低了用户在学习和操作过程中的认知难度,能够给用户呈现一个自然、真实的装配过程。

但与此同时,TVAS 系统也仍然存在一定的问题,例如在真实标记上加载虚拟零件模型的过程中,由于摄像头所采集图像的精度以及算法性能等问题,有时零件模型会出现一定程度的抖动,而在精度要求比较高的装配过程中,这种抖动有可能会给用户带来装配上的困难。同时,约束条件的界定方式也有待进一步研究。在后续的工作中,将通过改善识别算法以及交互技术上的其他创新来完善对这类问题的处理,使得 TVAS 系统能够有更加广泛的应用。

参考文献 (References)

- [1] Ishii H, Ullmer B. Tangible Bits: Towards seamless interfaces between people, bits and atoms[C]//Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems. New York: ACM Press, 1997: 234-241.
- [2] Lee G A, Billinghurst M, Kim G J. Occlusion based interaction methods for tangible augmented reality environments [C]//Proceedings of the 2004 ACM SIGGRAPH International Conference on Virtual Reality Continuum and its Applications in industry. New York: ACM Press, 2004: 419-426.
- [3] Irawati S, Ahn S, Kim J, et al. VARU framework: enabling rapid prototyping of VR, AR and ubiquitous applications[C]//Proceedings of IEEE Virtual Reality. Los Alamitos: IEEE, 2008: 201-208.
- [4] Sidharta R, Oliver J, Sannier A. Augmented reality tangible interface for distributed design review [C]//Proceedings of the International Conference on Computer Graphics, Imaging and Visualisation. Washington DC: IEEE Computer Society, 2006: 464-470.
- [5] Peng Tao, Li Shiqi, Wang Junfeng, et al. Virtual assembly based on augmented human-computer interaction technology[J]. Journal of Computer-aided Design & Computer Graphics, 2009, 21(3): 355-368. [彭涛,李世其,王俊峰,等.基于增强人机交互技术的虚拟装配[J].计算机辅助设计与图形学学报,2009,21(3): 355-368.]
- [6] Billinghurst M, Kato H, Poupyrev I. The magicBook: a transitional AR interface[J]. Computer and Graphics, 2001, 25(5): 745-753.
- [7] Lü Chunhua, Zhang Fengjun, Wu Huiyue, et al. Interaction techniques in scene planner system based on tangible user interface[J]. Journal of Computer-aided Design & Computer Graphics, 2009, 21(1): 113-119. [吕春花,张凤军,武汇岳,等.基于 TUI 的场景规划系统中的交互技术[J].计算机辅助设计与图形学学报,2009,21(1): 113-119.]
- [8] Jeon S, Kim G J. Providing a wide field of view for effective interaction in desktop tangible augmented reality [C]//Proceedings of IEEE Virtual Reality. Los Alamitos: IEEE, 2008: 3-10.