

一种基于关联-层次的飞机复杂机电组件虚拟维修建模方法

董健康 唐超 耿宏

(中国民航大学电子信息与自动化学院 天津 300300)

摘要 针对传统的维修仿真模型不满足虚拟维修环境的要求和缺乏通用性的问题,提出了一种基于关联-层次的飞机复杂机电组件虚拟维修建模方法。该方法将模型分为关联模型(顶层)、层次模型(中间层)和几何模型(底层)。关联模型体现了复杂机电组件与其他组件之间的关联关系,层次模型集成了组件自身的约束、功能、故障、结构等信息,几何模型用于虚拟维修环境中的实时显示和碰撞检测。建立的模型信息表达完整,具有普适性,能够满足虚拟环境对模型的要求,同时可以应用于机务维修训练。最后,通过实例验证了该建模方法的有效性。

关键词 虚拟维修,关联模型,层次模型,几何模型

中图分类号 TP391.9 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2018.12.031

Correlation-Hierarchy Based Virtual Maintenance Modeling Method for Complex Electromechanical Components of Aircraft

DONG Jian-kang TANG Chao GENG Hong

(School of Electronic Information and Automation, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract Aiming at the problems that the traditional maintenance simulation models don't meet the requirement of virtual maintenance environment and lack generality, this paper proposed a virtual maintenance modeling method of aircraft complex electromechanical components based on association-hierarchy. In this method, the model is divided into the top-level correlation model, the middle-level hierarchy model and the bottom-level geometric model. The correlation model reflects the relationship between complex electromechanical components and other components, the hierarchy model integrates the constraints, functions, faults and structures of itself, and the geometric model is used for real-time display and collision detection in the virtual maintenance environment. The established model information is complete and universal, which can meet the requirements of virtual environment for the model and be applied to the maintenance training of machine. Finally, the effectiveness of this modeling method is verified by the example.

Keywords Virtual maintenance, Relational model, Hierarchical model, Geometric model

1 引言

近年来,飞机虚拟维修是虚拟技术^[1-3]的一个重要研究方向,目的是通过采用计算机仿真和虚拟现实技术在计算机上真实展现飞机的维修过程^[4],是机务维修人员进行技能培训的重要途径。虚拟维修对象模型的建立是虚拟维修的前提^[5],复杂机电组件是飞机的重要组成部分,因此研究飞机复杂机电组件的建模方法^[6]尤为重要。

刘颖等^[7]分析了虚拟训练系统装备模型的基本特征,并将装备模型分为外观模型与机理模型,但缺少对虚拟维修对象模型之间关系的描述。耿宏等^[8]提出将故障注入方法和MFM建模理论相结合,建立飞机维修机械组件仿真模型,该模型可以表达组件的维修特性,但不能满足虚拟环境中碰撞

检测和虚拟手势识别等虚拟维修环境的要求。Zhong等^[9]研究了虚拟环境中的实体建模技术,提出了基于约束的建模方法,可以用于虚拟现实环境中直观和精确的实体建模,但缺少对故障信息^[10]的体现。

针对以上问题,通过将飞机复杂机电组件虚拟维修模型与真实的飞机复杂机电组件相比较,采用基于关联-层次的飞机复杂机电组件建模^[11]方法,建立复杂机电组件的虚拟维修模型^[12]。模型分为3层:顶层为关联模型;中间层为与维修拆装操作对应的层次模型,采用可能发生故障的组件与自身结构约束相结合的方法建立分层有向图,有向图由复杂机电组件节点、子组件节点和零件节点等组成,集成了模型的约束信息、故障信息、结构信息和功能信息,其中约束信息分为基于几何的约束信息和基于位置的约束信息;底层为几何模型,

到稿日期:2017-11-22 返修日期:2018-01-10 本文受国家自然科学基金重点项目(60832011),天津市科技攻关计划重点项目(06YFGZGX00700)资助。

董健康(1960-),男,硕士,教授,主要研究方向为电子系统故障诊断和飞机维修仿真,E-mail:offbreak@163.com(通信作者);唐超(1992-),男,硕士生,主要研究方向为虚拟维修仿真,E-mail:chaotang320@163.com;耿宏(1964-),男,硕士,教授,主要研究方向为民航数据分析和飞机维修工程。

由特征层、特征元素层、几何元素层组成,用于模型在虚拟维修环境中的实时显示。建立的模型适用于虚拟维修环境^[13],可应用于机务维修训练,体现模型的真实性和交互性^[14]。

2 复杂机电组件虚拟维修模型的建立

虚拟维修组件模型的建立是整个虚拟维修过程的前提,建立模型的关键是使得模型支持飞机的虚拟维修过程,为虚拟维修中所涉及的手势识别、碰撞检测提供所需的信息数据。虚拟维修模型由 3 层组成,如图 1 所示。顶层为关联模型;中间层为与维修拆装操作对应的层次模型,由复杂机电组件、子组件和零件等组成;底层为几何模型。顶层模型用于表现模型间的交互,在虚拟维修环境中的模型处于一个交互的环境中,模型与模型之间相互关联,用于复杂机电组件在维修时的整体拆装;中间层模型表示模型自身的组成部分,用于复杂机电组件自身的维修操作;底层模型为中间层模型基于物理属性的仿真提供数据支持,用于模型的实时显示并为碰撞检测提供模型基础。

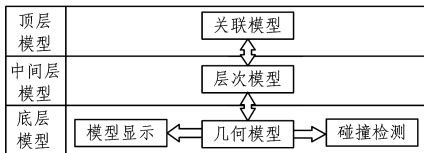


图 1 虚拟维修模型

Fig. 1 Virtual maintenance model

2.1 关联模型的建立

飞机的组件繁多,复杂机电组件并不是孤立存在于飞机中,不同的飞机组件通过连接构成飞机系统。在飞机维修中,复杂机电组件主要涉及的操作是发生故障时的拆装操作,关联关系模型用于描述约束条件对飞机复杂组件进行整体拆装操作的影响。约束条件变量采用 BOOL 型变量表示,约束条件包括故障变量 XF 、连接约束变量 CE 以及拆卸时的手势变量 HD ,不同的变量间采用逻辑运算,当运算结果满足条件时,进行复杂机电组件的拆装操作。

故障变量 XF 表示复杂机电组件在当前操作状态下的故障情况:

$$XF = \begin{cases} 1, & \text{虚拟维修系统控制端有故障注入} \\ 0, & \text{虚拟维修系统控制端无故障注入} \end{cases}$$

连接约束变量 CE 表示复杂机电组件与其连接的组件之间的连接关系。连接约束包含多种,具体包括接头螺帽连接、自封接头连接、螺帽连接、电插头连接、螺栓连接、电磁活门的接头连接等。 CE 由一组约束变量组成, $CE = (ce_1, ce_2, ce_3, \dots, ce_i)$ 表示复杂机电组件与多个组件间有连接关系,其中:

$$ce_i = \begin{cases} 1, & \text{复杂机电组件与其连接的组件 } i \text{ 分离} \\ 0, & \text{复杂机电组件与其连接的组件 } i \text{ 未分离} \end{cases}$$

ce_i 表示第 i 个与复杂机电组件连接的组件。当所有相连接的组件都去除连接时,复杂机电组件没有连接组件,转化为数学表达式为: $CE = \prod_{i=1}^i ce_i$ 。

$$CE = \begin{cases} 1, & \text{复杂机电组件与其连接的组件全部分离} \\ 0, & \text{复杂机电组件与其连接的组件未全部分离} \end{cases}$$

拆卸时的手势变量 HD 表示复杂机电组件在进行拆卸时所需要的手势。在虚拟维修环境中,虚拟人通过操作手势与复杂机电组件相互作用,只有正确的手势才能进行相关的操作。

$$HD = \begin{cases} 1, & \text{操作手势正确} \\ 0, & \text{操作手势错误} \end{cases}$$

复杂机电组件可以拆装操作的数学表达式为: $CH = XF \cap CE \cap HD$ 。一个组件可以进行拆装的条件是:系统有故障信号输入,没有零件与复杂机电组件相连接,对复杂机电组件进行拆装的手势正确。

$$CH = \begin{cases} 1, & \text{复杂机电组件离位} \\ 0, & \text{复杂机电组件在位} \end{cases}$$

当 $CH = 1$ 时,实现复杂机电组件的拆卸和安装。拆卸过程是组件的整体移动,具体体现为坐标的变化,设复杂机电组件的初始坐标为 M_0 ,目标坐标为 M_t ,则模型运动的数学表达式为 $M_t = M_0 + \Delta M$ 。复杂机电组件的坐标信息存储在底层模型,用于体现位置信息的变化。

2.2 层次模型的建立

层次模型是虚拟维修模型信息表达的核心,包含复杂机电组件在虚拟维修过程中所涉及的各类信息,使得模型能够按照飞机维修工卡的操作流程完成相关操作,以满足在虚拟维修环境中进行虚拟维修的可行性。复杂机电组件的层次模型包含分层有向图、约束信息、模型功能 3 方面内容。对飞机复杂机电组件进行整体拆装后,需要对复杂机电组件中的具体零部件进行拆装操作。采用分层有向图的形式来表示复杂机电组件,复杂机电组件以及组成部分可以看作是组成层次有向图的一个节点。通过节点间的层次关系来映射复杂机电组件及其组成的零部件所构成的拆装层次结构。可以进行拆卸的条件是:复杂机电组件已经被整体拆除,不同层次间的映射关系和同一层次间的约束关系被去除。

2.2.1 分层有向图的建立

分层有向图用 G_S 表示复杂机电组件的结构组成,如图 2 所示。节点集合 V 由复杂机电组件、子组件和零件节点组成,即 $V = V_{CC} \cup V_{SC} \cup V_P$ 。

$$V = \{v_i | v_i \text{ 为复杂机电组件、子组件或零件节点}\}$$

其中, V_{CC} 表示复杂机电组件节点, V_{SC} 表示子组件节点, V_P 表示零件节点。

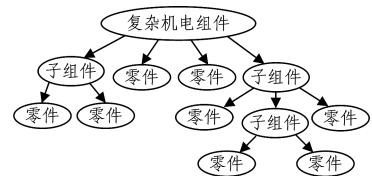


图 2 分层有向图

Fig. 2 Hierarchical directed graph

支路集合 $E = E_1 \cup E_2 \cup E_3 \cup E_4 \cup E_5$,其中 $E_1 = V_{CC}V_{SC}$, $E_2 = V_{CC}V_P$, $E_3 = V_{SC}V_{SC}$, $E_4 = V_{SC}V_P$, $E_5 = V_PV_P$ 。 E_1 表示复杂机电组件节点与子组件节点之间的有向边; E_2 表示复杂机电组件节点与零件节点之间的有向边; E_3 表示子组件节点与子组件节点之间的有向边; E_4 表示子组件节点与零件节点之间的有向边; E_5 表示零件节点与零件节点之间的有向边。

有向边用来表示层次之间的映射关系,下一层中的零件与上一层中的子组件具有映射关系,当映射关系没有被破坏时,说明零件仍然在子组件之中,此时不能对零件进行维修操作。

$$E_n = \begin{cases} 1, & \text{层次间某两个不具有映射关系} \\ 0, & \text{层次间某两个具有映射关系} \end{cases}$$

当对某一个组成组件进行维修时,需要将其拆卸出来,此时需要先将上一层的子组件拆卸,通过破坏层次间传递的全部映射关系,最终到达目标零件。

$$E = \prod_1^n E_n$$

$$E = \begin{cases} 1, & \text{到达零件的整条路径上不具有映射关系} \\ 0, & \text{到达零件的整条路径上具有映射关系} \end{cases}$$

零件在同一层次之间存在约束关系时,需要解除零件间的约束关系才能实现对零件的拆卸操作。约束关系采用约束变量的形式表示,同一层次上涉及的约束包括 $C = C_1 \cup C_2 \cup C_3$,其中 $C_1 = V_{sc} V_{sc}, C_2 = V_{sc} V_p, C_3 = V_p V_p$ 。当同一层的零件或子组件之间的约束取消时,两个模型可以进行维修操作。

$$C = \begin{cases} 1, & \text{同一层次没有相互影响的模型} \\ 0, & \text{同一层次有相互影响的模型} \end{cases}$$

维修操作的手势变量用 Hd 表示:

$$Hd = \begin{cases} 1, & \text{操作手势正确} \\ 0, & \text{操作手势不正确} \end{cases}$$

零件可进行拆卸操作的数学表达式为:

$$Ch = E \cap C \cap Hd$$

$$Ch = \begin{cases} 1, & \text{维修的目标组件离位} \\ 0, & \text{维修的目标组件在位} \end{cases}$$

当 $Ch = 1$ 时,复杂机电组件中的目标维修组成部分可以进行维修操作。

2.2.2 约束信息

同一层次间的约束包括位置约束 $C_{i,j}^l$ 和几何约束 $C_{i,j}^g$,用于模型具体维修中的拆装操作。由一组方程来表示基于位置的约束,假设约束方程组有 n 个变量和 $m (n \geq m)$ 个方程: $F(x) = 0; R^n \rightarrow R^m$ 。基于位置的约束用于零件的安装,在零件安装过程中,通常是一个零件向另一个零件移动,其中一个为安装基本件。方程 $G(x) = F(x) - F(x_0); R^n \rightarrow R^m$ 表示从初始位置到当前位置的距离,其中 x_0 是可移动零件的初始位置,应用 Newton-Raphson 方法得出该方程的解,完成零件的安装。

基于几何的约束是通过一系列的位置转换来改变零件的位置,从而描述零件之间的关系的一组约束。首先,将几何约束存储在层次有向图中;然后,在给定的公差范围内移动而靠近参考模型的目标模型时触发约束识别过程,以自动识别模型之间的几何约束,如平行、角对称、重合、切线等;最后,目标模型根据实际的运动状态进行位置变换,以满足所识别的约束条件。 $C_{i,j}^g$ 表示零件间的一组几何约束, $C_{i,j}^g = (C_{i,j}^{g_1}, C_{i,j}^{g_2}, \dots, C_{i,j}^{g_m})$, $C_{i,j}^g = (GeX, GeY, B_x, B_y, \delta)$ 主要表现为维修过程中的拆卸操作,在这个过程中使用几何约束来引导操作对象的移动,如重合、偏移等。其中, GeX 表示几何约束中的基准几何元素(点、轴、面等); GeY 表示被约束的几何元素; B_x 表示 GeX 所属的零件 X ; B_y 表示 GeY 所属的零件 Y ,在操作时不移动; δ 是约束矩阵。

2.2.3 功能信息

复杂机电组件的功能可通过输入输出变量来体现。组件的功能模型指组件在虚拟环境中的行为,可抽象为输入、输出及其函数关系。功能模型可形式化描述为: $E_u^i = \{IP_u, OP_u, F_u^i\}$, E_u^i 为组件 P_u 在状态 S 时的功能模型, $IP_u = (ip_{u1}, ip_{u2}, \dots, ip_{uj})$ 为输入级, $OP_u = (op_{u1}, op_{u2}, \dots, op_{uj})$ 为输出级, F 为输入与输出的关系描述集。当 S 为故障状态时, E_u^i 为组件故障的描述。

2.3 几何模型的建立

传统的维修模型在进行组件拆装时未考虑同层子部件间的干涉,使得零部件在进行维修操作时会出现穿透的现象。在底层模型中建立几何元素层,复杂机电组件模型在虚拟维修环境中通过一系列的三角面片来表现。针对层次结构中的组成部件,建立层次包围盒,为维修操作时组件的相互碰撞建立模型基础。复杂机电组件在进行维修操作时,模型与模型之间的交互繁多,传统的模型都是人为设定模型运动的起始位置,通过对模型进行简单的显示与隐藏来完成对模型的操作,增加了虚拟维修系统的资源量,不利于模型的实时渲染。显示模型往往采用三角面片模型来表示,在中间层定义了零件的结构关系,弥补了面片信息不能定义零件的结构关系的不足,同时有利于高速渲染。

位于底层的几何模型是模型显示和碰撞检测的模型基础和数据源。如图3所示,特征是构成零件的基础,特征的组成元素是特征元素,每个特征元素又由若干几何元素组成,特征与特征元素以及特征元素与几何元素之间存在映射关系,几何模型的表达与组织应具有高效性,以满足系统的实时交互。

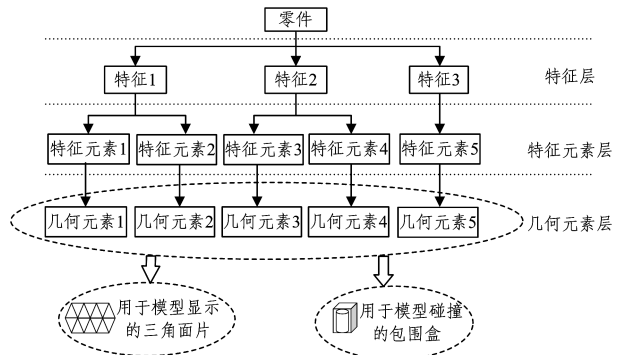


图3 虚拟维修中零件的数据结构图

Fig. 3 Data structure of parts in virtual maintenance

2.3.1 零件层的信息表达

PP 表示零件的物理参数, $PP = [k, f, nv, w, i]$ 。其中, k 表示复杂机电组件的刚度; f 表示模型表面的摩擦系数; nv 表示法向力,通过 $F = F_c \sin(\nu)$, $F_c = fnv$ 计算,可用于模型在维修操作中涉及的相对运动时的计算; w 表示物体的质量; i 表示物体的惯性。力反馈涉及虚拟物体的刚度、重量和惯性。

2.3.2 特征层的信息表达

特征层 F 以特征为基本节点,特征层可描述为: $F = [F_id, F_name, F_type, F_po, F_pa]$, F_id 表示特征标识, F_name 表示特征名称, F_type 表示特征类型, F_po 表示特征定位, F_pa 表示特征参数。 $F_type = (F_type_shape, F_type_assembly)$, $F_type_assembly$ 表示形状特征, F_type_shape 表示拆装特征。

2.3.3 特征元素层的信息表达

特征元素层 G 以面为基本节点, $G = \{S_1, S_2, \dots, S_n\}$, S_n 表示几何面节点集合, $S_n = [name, type, size]$, 其中, $name$ 表示几何面名称, $type$ 表示类型, $size$ 表示尺寸。

2.3.4 几何元素层的信息表达

几何元素层 P 的目的是满足虚拟维修环境中实时性的需求,用于虚拟环境下的模型渲染和显示,以及边缘/多边形和多边形/多边形交点的测试,进而可以实现精确到面片级别的碰撞检测。通过 LOD 自动批处理生成算法^[15-16],去除孔、倒角等特征处存在的较大冗余三角面片,简化三角面片的数量,以提高实时可视化的效率,加快虚拟维修环境中模型交互的速度。几何元素层可描述为: $PO = \{Vc, Se, Nv, Pc, Te, Il\}$ 。其中, PO 表示三角面片节点集合。 Vc 表示三角面片的顶点坐标,三角面片的每一顶点的三维坐标用浮点表示。 Se 表示构成一个三角面片的整型顶点索引信息,存放于面表中。 $Se = r + R(t)P_o$, $r = [x, y, z]^T$ 为局部坐标系 $o'x'y'z'$ 原点 o' 在全局坐标系 $oxyz$ 中的坐标; $R(t)$ 为三维矩阵, $R(t) = \begin{pmatrix} r_{xx} & r_{yx} & r_{zx} \\ r_{xy} & r_{yy} & r_{zy} \\ r_{xz} & r_{yz} & r_{zz} \end{pmatrix}$, 表示局部坐标系和全局坐标系之间的相对旋转, $R(t)$ 的第 1-3 列分别表示全局坐标系下局部坐标系 X, Y, Z 轴的方向向量; P_o 为局部坐标系中的坐标。 Nv 是法向量, Se 和 Nv 用于确定三角面片所处的空间位置。 Pc 是三角面片颜色属性。 Te 是三角面片的纹理。 Il 是三角面片的光照属性。

3 建模举例

飞机动力转换组件 (PTU) 属于飞机复杂机电组件,位于主起落架舱内,负责黄绿液压系统之间的动力转换。根据飞机维修手册,分析归纳出与动力转换组件相连接的组件以及连接方式,如表 1 所列。

表 1 动力转换组件的连接组件以及连接方式

Table 1 Connected units of PTU and relevant connected patterns

| 连接变量 | 连接方式 | 连接的组件 |
|--------|------|---------------|
| ce_1 | 接头螺帽 | 黄液压系统的壳体余油软管 |
| ce_2 | 接头螺帽 | 绿液压系统的壳体余油软管 |
| ce_3 | 接头螺帽 | 绿液压系统的 HP 孔软管 |
| ce_4 | 自封接头 | 绿液压系统的 LP 孔软管 |
| ce_5 | 自封接头 | 黄液压系统的 LP 孔软管 |
| ce_6 | 接头螺帽 | 黄液压系统的 HP 孔软管 |
| ce_7 | 接头螺帽 | 密封余油口的连接软管 |
| ce_8 | 螺帽 | 螺钉 |
| ce_9 | 螺栓 | 垫片 |

$CE = \prod_1^{10} ce_i$, 此时对动力转换组件的操作手势是搬动复杂机电组件的手势。 $E = XF \cap CE \cap HD$, 若 $E = 1$, 则可以对动力转换组件进行整体拆卸。

动力转换组件的层次模型如图 4 所示。对液压马达进行维修操作时,首先要求不变组件处于离位状态,不变组件所处的状态变量为 E_{bp} , 同时液压马达与液压泵之间通过连接轴连接,连接变量为 V_l , 对液压马达进行维修操作的手势为 Hd , 最终得到 $Q = E_{bp} \cap V_l \cap Hd$, 若 $Q = 1$, 则可以对液压马达进行维修操作。

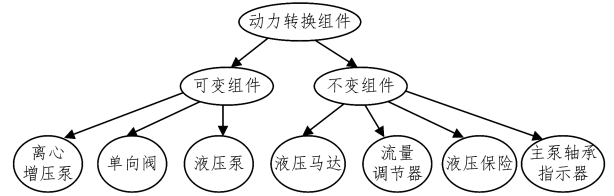


图 4 动力转换组件的层次有向图

Fig. 4 Hierarchical directed graph of PTU

动力转换组件在虚拟维修场景中的显示图及拆装过程如图 5—图 8 所示。

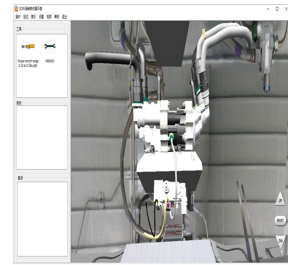


图 5 虚拟维修环境中的动力转换组件

Fig. 5 PTU in virtual maintenance environment

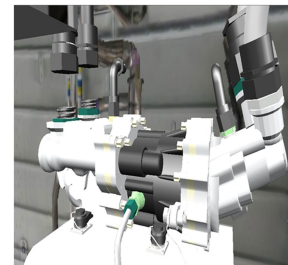


图 6 拆卸与动力转换组件连接的两个接头螺帽

Fig. 6 Removing two coupling nuts connected with PTU

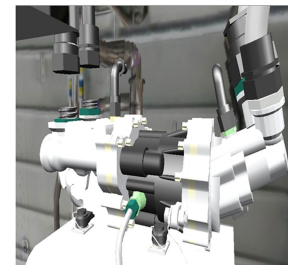


图 7 将与动力转换组件相连的组件全部拆除

Fig. 7 Completely removing all units connected with PTU

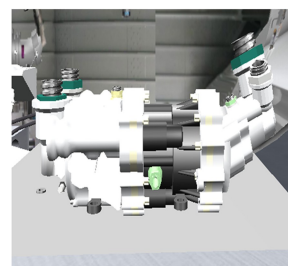


图 8 处于离位状态下的动力转换组件

Fig. 8 PTU in off-location state

结束语 通过多层次的数据结构描述了从顶层模型到底 (下转第 216 页)

场重建[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(26): 1301-1307.

- [20] DAUBECHIES I, DEFRISE M, DE MOL C. An iterative thresholding algorithm for linear inverse problems with a sparsity constraint[J]. Communications on Pure and Applied Mathematics, 2004, 57(11): 1413-1457.
- [21] FIGUEIREDO M A T, NOWAK R D, WRIGHT S J. Gradient projection for sparse reconstruction: Application to compressed

sensing and other inverse problems[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2007, 1(4): 586-597.

- [22] HUANG Y. Iterative Regularization Methods for Large-Scale Discrete Ill-Posed Problems[D]. Beijing: Tsinghua University, 2015. (in Chinese)
- 黄漪. 大规模离散不定问题迭代正则化方法的研究[D]. 北京: 清华大学, 2015.

(上接第 195 页)

层模型的整个建模过程, 用于对虚拟维修环境中的复杂机电组件的建模, 建立分层有向图, 有利于虚拟维修建模过程中根据不同的任务对不同层次的零件信息进行操作, 从而满足虚拟维修环境中模型实时交互性的要求。该模型具有碰撞检测以及虚拟手势识别等特性, 可以应用到虚拟维修系统中。通过在虚拟环境中的仿真操作, 验证了该建模方法的可行性。

为使得所建立的模型更具真实感以及操作时的沉浸感, 可以在以后的建模过程中添加实时的阴影效果。

参 考 文 献

- [1] LIU J, LIU Y. A Review of the Development of Virtual Maintenance Technology [J]. Journal of Computer-Aided Design and Graphics, 2009, 21(11): 1519-1534. (in Chinese)
- 刘佳, 刘毅. 虚拟维修技术发展综述[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2009, 21(11): 1519-1534.
- [2] ZHOU D, HUO L, WANG M H, et al. Research and Application of Virtual Maintenance Technology [J]. Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2011, 37(2): 231-236. (in Chinese)
- 周栋, 霍琳, 王美慧, 等. 虚拟维修技术研究与应用[J]. 北京航空航天大学学报, 2011, 37(2): 231-236.
- [3] MA L, LV C. Research on Virtual Maintenance Technology [J]. Journal of Computer-Aided Design and Graphics, 2005, 17(12): 2729-2733. (in Chinese)
- 马麟, 吕川. 虚拟维修技术的探讨[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2005, 17(12): 2729-2733.
- [4] WEBEL S, BOCKHOLT U, ENGELKE T, et al. An augmented reality training platform for assembly and maintenance skills [J]. Robotics & Autonomous Systems, 2013, 61(4): 398-403.
- [5] LIU B B, TIAN L, YANG Y H, et al. Key Technologies of Aviation Virtual Maintenance System [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2012, 18(1): 47-57. (in Chinese)
- 刘钊钊, 田凌, 杨宇航, 等. 航空虚拟维修系统关键技术[J]. 计算机集成制造系统, 2012, 18(1): 47-57.
- [6] JIANG K Y, HAO J P. Immersive Virtual Maintenance Simulation System and Its Implementation [J]. Journal of Computer-Aided Design and Graphics, 2005, 17(5): 1120-1123. (in Chinese)
- 蒋科艺, 郝建平. 沉浸式虚拟维修仿真系统及其实现[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2005, 17(5): 1120-1123.
- [7] LIU Y, ZHU Y C, DI Y Q, et al. Study on Modeling Method of Complex Equipment in Virtual Training System [J]. Journal of Ordnance Engineering College, 2008, 20(3): 4-7. (in Chinese)
- 刘颖, 朱元昌, 邸彦强, 等. 虚拟训练系统复杂装备建模方法研究 [J]. 军械工程学院学报, 2008, 20(3): 4-7.
- [8] GENG H, ZANG L, LIU J X, et al. Study on Simulation Model of Aircraft Maintenance Mechanical Component [J]. Computer Simulation, 2016, 33(8): 17-21. (in Chinese)
- 耿宏, 臧林, 刘家学, 等. 关于飞机维修机械组件仿真模型研究 [J]. 计算机仿真, 2016, 33(8): 17-21.
- [9] ZHONG Y M, WOLFGANG M W, MA W Y, et al. A Hierarchically Structured Constraint-based Data Model for Solid Modelling in A Virtual Reality Environment [C] // International Symposium on Cyber Worlds. IEEE Computer Society, 2002: 537-544.
- [10] YU H Q, PENG G L, LIU W J, et al. Establishment of Maintenance Information Model Based on Virtual Environment [J]. Acta Tribune of China, 2010, 31(7): 998-1002. (in Chinese)
- 于海全, 彭高亮, 刘文剑, 等. 基于虚拟环境的维修性信息模型的建立 [J]. 兵工学报, 2010, 31(7): 998-1002.
- [11] JIANG W, ZHENG J J, ZHOU H Z, et al. A new constraint-based virtual environment for haptic assembly training [J]. Advances in Engineering Software, 2016, 98(C): 58-68.
- [12] WANG X G, SU Q X, GU H Q, et al. Model of virtual maintenance prototype modeling for complex equipment [J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(s1): 39-41, 64. (in Chinese)
- 王晓光, 苏群星, 谷宏强, 等. 复杂装备的虚拟维修样机建模方法 [J]. 系统仿真学报, 2009, 21(s1): 39-41, 64.
- [13] SU Q X, LIU P Y. Design of virtual maintenance training system for large and complex equipment [J]. Journal of Bing Machinery, 2006, 27(1): 79-83. (in Chinese)
- 苏群星, 刘鹏远. 大型复杂装备虚拟维修训练系统设计 [J]. 兵工学报, 2006, 27(1): 79-83.
- [14] LEU M C, ELMARAGHY H A, NEE A Y C, et al. CAD model based virtual assembly simulation, planning and training [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2013, 62(2): 799-822.
- [15] TUN D M, ZHAO G. Real-time visualization of large scale aircraft model for assembly [J]. Journal of Computer-Aided Design and Graphics, 2012, 24(5): 590-597. (in Chinese)
- 谈敦铭, 赵星. 面向装配的飞行器超大模型实时可视化技术 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2012, 24(5): 590-597.
- [16] TIAN M, MA L, ZHANG W W. Research on the Algorithm of Rope Route Planning in Virtual Maintenance Environment [J]. Journal of Chongqing Institute of Technology (Natural Science), 2013, 27(6): 100-105. (in Chinese)
- 田冕, 马龙, 张卫. 虚拟维修环境下的线绳布线算法 [J]. 重庆理工大学学报 (自然科学), 2013, 27(6): 100-105.