

7-15-2020

Maintenance Operation Control of Virtual Human in Collaborative Virtual Maintenance

Liang Feng

Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China;

Zhili Zhang

Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China;

Xiangyang Li

Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Maintenance Operation Control of Virtual Human in Collaborative Virtual Maintenance

Abstract

Abstract: Aiming at the operators being not able to move freely in the limited capture area of optical motion capture devices, the maintenance operation control of virtual human in Collaborative Virtual Maintenance is studied. *The lower limb action of operators is captured by the optical motion capture devices, and the wide range motion of the virtual human is controlled according to the real-time recognition results. In order to control the hand motion process of the virtual human in the maintenance operation, the hand interaction of the virtual human is analyzed and an intelligent assistant method for the maintenance operations based on the dynamic Bayesian network is proposed.* A collaborative virtual maintenance operation simulation platform of a hydraulic cylinder is taken to prove the feasibility of the method. The method can control the maintenance operation process of virtual human effectively, and has good performance of real-time wish, interactivity and perceptibility.

Keywords

virtual human, action recognition, motion control, maintenance operation

Recommended Citation

Liang Feng, Zhang Zhili, Li Xiangyang. Maintenance Operation Control of Virtual Human in Collaborative Virtual Maintenance[J]. Journal of System Simulation, 2020, 32(7): 1201-1210.

协同虚拟维修过程中的虚拟人体维修操作控制

梁丰, 张志利, 李向阳

(火箭军工程大学, 陕西 西安 710025)

摘要: 针对操作人员难以在有限的光学运动捕捉设备捕捉范围内自由运动的问题, 开展了协同虚拟维修过程中的虚拟人体维修操作控制研究。基于光学运动捕捉设备对操作人员的下肢动作进行捕捉, 根据实时识别结果控制虚拟人体进行大范围运动。针对维修操作过程中的虚拟人体手部运动控制, 分析了虚拟人体的手部交互过程, 提出了一种基于动态贝叶斯网络的维修操作智能辅助方法。以某液压缸协同式虚拟维修操作仿真平台为例验证了方法的有效性。该方法实现了对虚拟人体维修操作过程的有效控制, 具有实时性好、交互性与感知性强等优点。

关键词: 虚拟人体; 动作识别; 运动控制; 维修操作

中图分类号: TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2020) 07-1201-10

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.20-0266

Maintenance Operation Control of Virtual Human in Collaborative Virtual Maintenance

Liang Feng, Zhang Zhili, Li Xiangyang

(Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China)

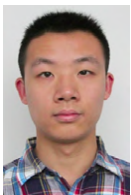
Abstract: Aiming at the operators being not able to move freely in the limited capture area of optical motion capture devices, the maintenance operation control of virtual human in Collaborative Virtual Maintenance is studied. The lower limb action of operators is captured by the optical motion capture devices, and the wide range motion of the virtual human is controlled according to the real-time recognition results. In order to control the hand motion process of the virtual human in the maintenance operation, the hand interaction of the virtual human is analyzed and an intelligent assistant method for the maintenance operations based on the dynamic Bayesian network is proposed. A collaborative virtual maintenance operation simulation platform of a hydraulic cylinder is taken to prove the feasibility of the method. The method can control the maintenance operation process of virtual human effectively, and has good performance of real-time wish, interactivity and perceptibility.

Keywords: virtual human; action recognition; motion control; maintenance operation

引言

随着增强现实技术的发展, 虚拟现实交互方式由于能给人们带来更为直观的交互体验, 所以越来越

越受到人们的重视^[1]。特别是“Pokemon Go”游戏的风靡全球, 通过手机等便携式设备获得人体运动轨迹和参数信息, 并将其识别为人体的运动过程, 为人们参与游戏娱乐和操作工作带来了很好的体验, 也使得人们通过自身行为参与虚拟世界娱乐和工作的意愿更为强烈。与一般的游戏过程不同, 大型装备的虚拟维修操作过程, 往往需要操作人员在一个有限的空间内实施, 实现装备零部件模型、维修资源模型和虚拟维修人体之间的准确交互, 该操



收稿日期: 2020-05-21 修回日期: 2020-06-27;
基金项目: 国家自然科学基金(61702524), 陕西省自然科学基金(2016JQ6052);
作者简介: 梁丰(1987-), 男, 湖北天门, 博士, 研究方向为发射系统仿真; 张志利(1966-), 男, 河南濮阳, 博士, 教授, 博导, 研究方向为发射系统仿真; 李向阳(1984-), 男, 河南汝州, 博士, 副教授, 研究方向为发射系统仿真。

<http://www.china-simulation.com>

• 1201 •

作过程的逼真度、实时性、交互性和准确度直接影响并决定着虚拟维修训练操作的效果^[2]。光学运动捕捉设备在人体运动信息的准确获取中应用广泛,但由于光学运动捕捉设备的捕捉范围有限,使得操作人员进行行走或跑步等大范围运动时,容易出现操作人员动作间相互干扰或者运动距离超出设备捕捉范围的问题。此外,由于网络时延、丢包等原因,操作人员与虚拟人体之间可能出现动作不匹配的情况^[3]。为了实现对虚拟人体协同维修操作过程的准确控制,针对有限运动捕捉范围下的虚拟人体维修操作过程控制展开了研究。首先,提出一种基于人体下肢动作识别的虚拟人体大范围运动控制方法,在基于光学运动捕捉设备对维修操作人员的下肢动作过程进行实时捕捉和识别的基础上,根据不同的运动过程,采用相应的步幅,控制虚拟人体进行大范围运动,到达操作位置后再根据运动捕捉数据控制虚拟人体的维修操作。其次,针对虚拟维修操作过程中的虚拟人体手部运动控制,分析了虚拟人体的手部交互过程,提出了一种智能辅助方

法。最后,以某液压缸协同式虚拟维修操作仿真平台为例,验证了该方法的有效性。

1 虚拟人体大范围运动过程控制

1.1 人体下肢动作实时识别

基于光学运动捕捉设备对操作人员运动过程进行实时捕捉时,获得的人体运动数据经过修正、滤波^[4]、插值运算^[5]及运动重定向^[6]后,可以用来驱动虚拟人体按照操作人员的动作过程进行运动。但由于运动捕捉设备的捕捉范围有限,在控制虚拟人体进行大范围运动的过程中,容易出现操作人员脱离捕捉范围,无法正常提供虚拟人体运动数据的情况。针对该问题,提出在对操作人员下肢动作过程进行实时识别的基础上,根据已有的固定步长运动条件下虚拟人体运动数据实现对虚拟人体大范围运动过程的控制^[7]。

在对人体下肢运动过程进行捕捉时,常采用的人体骨架模型如图 1 所示。

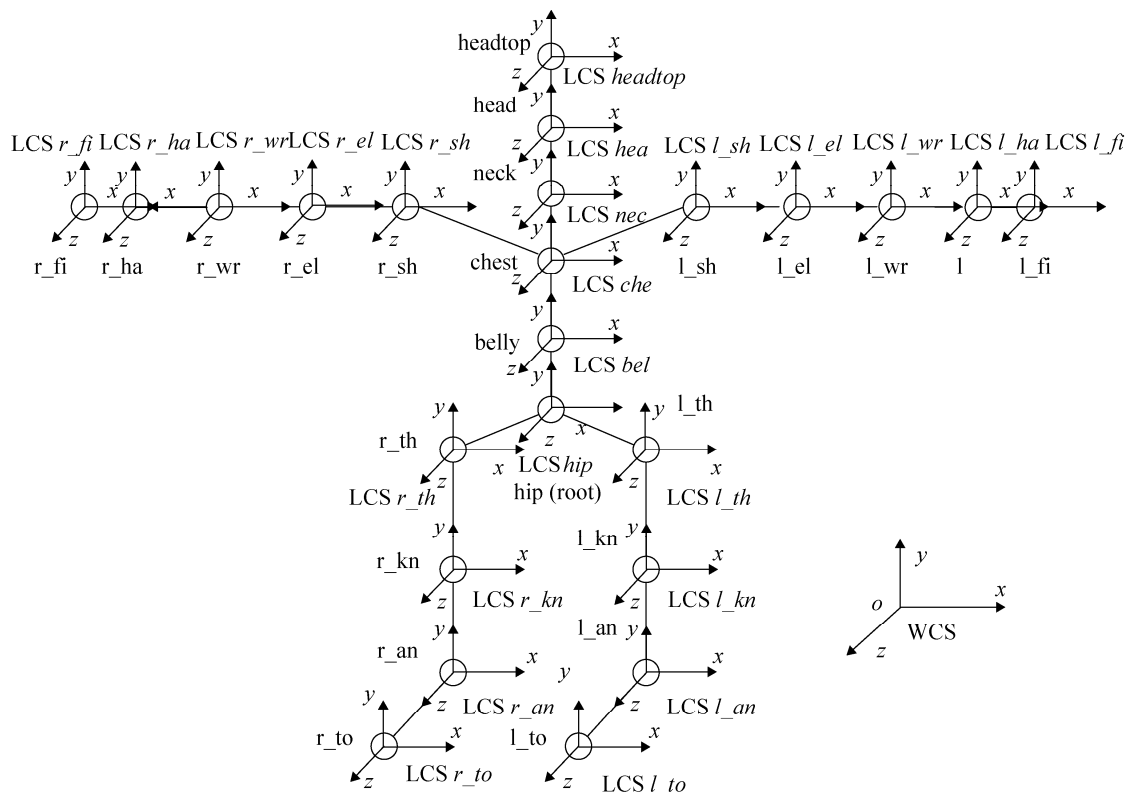


图 1 人体骨架模型

Fig. 1 Human skeleton model

<http://www.china-simulation.com>

图 1 中, 人体下肢运动链主要包括 hip 点、左右 thigh 点、左右 knee 点、左右 ankle 点及左右 toes 点等 9 个关节点。一般以臀部关节点 hip 点作为根关节点, 然后依据关节点间的连接关系, 以及与 hip 点相邻的先后顺序确定出关节点间的父子关系。其中, 世界坐标系(world coordinate system, WCS), hip 点、左右 thigh 点、左右 knee 点、左右 ankle 点及左右 toes 点局部坐标系(local coordinate system, LCS) LCS_{hip} , $CS_{l_{th}}$, $LCS_{r_{th}}$, $LCS_{l_{kn}}$, $LCS_{r_{kn}}$, $LCS_{l_{an}}$, $LCS_{r_{an}}$, $LCS_{l_{to}}$ 及 $LCS_{r_{to}}$ 的设置如图 1 所示。

由于操作人员运动过程具有一定的随机性, 因此 hip 点在世界坐标系 x 、 z 轴上的坐标变化往往难以表现出较为明显的、固有的变化规律。为了降低人体体型差异对人体动作识别带来的影响, 选择 hip 点在世界坐标系 y 轴上的变化速度及 thigh 与 knee 关节点的旋转角度信息作为识别对象, 提出在运动参数信息进行滤波去噪后, 基于小波分形和最小二乘拟合的方法, 获得各运动参数的动作特征信息, 再基于 SVM 实现对各动作特征信息的识别, 最后采用证据理论对各运动参数识别结果进行融合, 从而实现对人体下肢运动过程的实时识别^[8]。采用 CMU 和 HDM05 人体运动数据库分别对人体下肢动作识别方法进行了验证, 该方法无需提取运动过程的关键帧, 不用采用长时间的动作序列, 避免了采用动态时间规划方法造成的计算量大问题, 较大程度上避免了体型差异给提取动作特征带来的干扰, 可以面对不同体型的人员, 且计算过程更为简单, 实时性好^[9]。

1.2 虚拟人体运动过程控制

光学运动捕捉设备可以对操作人员的行走及跑步过程进行捕捉, 采用运动编辑技术可以获得虚拟人体在虚拟环境中按照一定步幅运动的动作数据, 主要包括 hip 点在 WCS 中各轴上的速度变化曲线及下肢各子关节点相对于其父关节点在 LCS 中各轴上的角度变化曲线。由于在控制虚拟人体运

动的过程中, 虚拟人体的空间位置主要取决于 hip 点在 WCS 中的空间位置坐标, 其他子关节点都是相对其父关节点 LCS 作旋转运动, 因此在基于操作人员下肢运动过程控制虚拟人体 hip 点在 WCS 中以固定步幅进行运动时, 采用已获得子关节点相对于父关节点 LCS 中的运动变化数据, 基于正向运动学可以计算虚拟人体下肢其他关节点的运动轨迹, 即可实现对虚拟人体下肢运动过程的仿真和控制。虚拟人体在虚拟环境中运动方向的差异可以用 hip 点绕 WCS 中 y 轴的旋转角度表示, 因而虚拟人体运动方向对 hip 点在 WCS 中 y 轴上的坐标变化规律影响较小, 对 x 和 z 轴上的变化规律影响较大。根据捕捉的人体运动数据, 可以计算人体在行走及跑步过程中 hip 点的 $v_x(t)$ 、 $v_y(t)$ 及 $v_z(t)$ 变化曲线, 用 $v_m(t)$ 表示 hip 点在 xoz 平面上的速度变化, 其计算过程为:

$$v_m(t) = \sqrt{v_x^2(t) + v_z^2(t)} \quad (1)$$

将虚拟人体行走与跑步过程的运动步幅分别设定为 $S_w=0.55$ m 和 $S_r=0.85$ m, 基于运动编辑技术获得的 hip 点 $v_y(t)$ 与 $v_m(t)$ 变化曲线分别如图 2 所示。

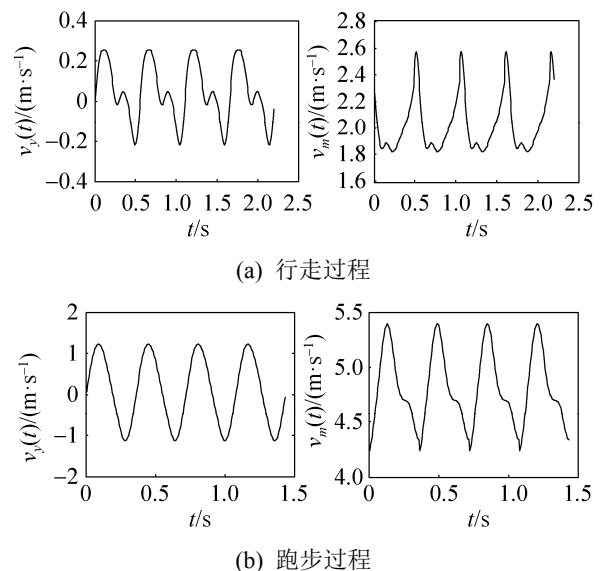


图 2 hip 点 $v_y(t)$ 与 $v_m(t)$ 变化曲线
Fig. 2 $v_y(t)$ and $v_m(t)$ curves of hip joint

从图 2 可以发现, 在行走与跑步过程中人体 hip 点运动数据有着不同的变化过程。基于人体下

肢动作实时识别方法,采用 hip 点在 WCS 中的 $v_y(t)$ 变化曲线,以及 thigh 点与 knee 点相对于父关节点在 LCS 中各轴的变化角度曲线,获取人体下肢动作特征,可以实现对人体在运动捕捉区域内原地行走和跑步过程进行识别,同时结合人体左、右肘部关节绕 y 轴的旋转角度(即腕部关节点 LCS_{l_wr} 、 LCS_{r_wr} 分别相对于肘部关节点 LCS_{l_el} 、 LCS_{r_el} 中 y 轴的旋转角度),控制虚拟人体以固定的步幅和相应的运动方式进行前进或后退,从而实现对虚拟人体在虚拟维修操作环境中下肢运动过程的控制。具体实施过程如下:

(1) 初始时刻,虚拟人体在虚拟维修环境 WCS 中的姿态如图 3 所示,虚拟人体 hip 点 LCS_{hip} 各轴在 WCS 中的方向与 WCS 中各轴的方向相同。设定阈值 S_y ,当根据运动捕捉数据计算发现操作人员左右 ankle 点在运动捕捉环境 WCS 中的 y 坐标小于 S_y 时,即判定此时操作人员相应的脚部与地面接触。

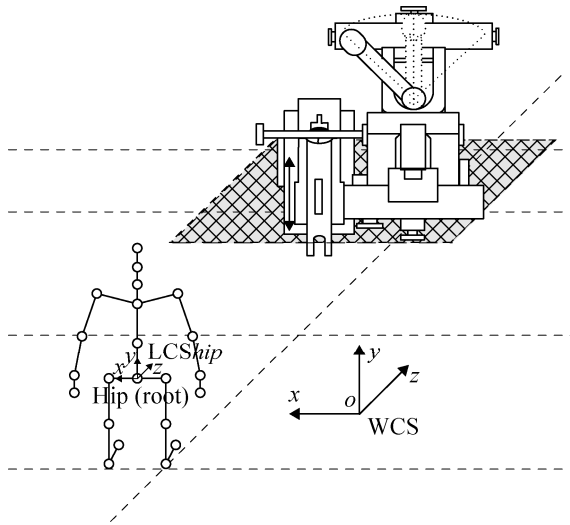


图 3 维修操作过程中虚拟人体的初始姿态
Fig. 3 Initial posture of virtual human in maintenance operation process

(2) 用 $[x_{hip}(t), y_{hip}(t), z_{hip}(t)]$ 表示虚拟人体 hip 点 t 时刻在 WCS 中的空间位置坐标,将 LCS_{hip} 相对于 WCS 各轴的旋转角度表示为 $[\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z]$ 。当右上肢肘部关节点绕 x 轴的旋转角度 $\theta_{rx} \in [85^\circ, 95^\circ]$ 、左上肢肘部关节点绕 x 轴的旋转角度 $\theta_{lx} \in [0^\circ, 8^\circ]$,或左上肢肘部关节点绕 x 轴的旋转角度

$\theta_{lx} \in [85^\circ, 95^\circ]$ 、右上肢肘部关节点绕 x 轴的旋转角度 $\theta_{rx} \in [0^\circ, 8^\circ]$ 时,对邻近的 T_1 时间段($T_1=0.3$ s)人体原地的下肢动作过程进行识别。

(3) 当识别结果为行走或跑步过程,且发现该时间内操作人员有脚部第一次与地面接触或双脚交替与地面接触时,根据操作人员的运动类型,控制虚拟人体在虚拟环境中进行相应的行走或跑步动作。其中,当右上肢肘部关节点绕 x 轴的旋转角度 $\theta_{rx} \in [85^\circ, 95^\circ]$ 、左上肢肘部关节点绕 x 轴的旋转角度 $\theta_{lx} \in [0^\circ, 8^\circ]$ 时,根据捕捉的人体下肢动作数据正向控制虚拟人体进行前进;当左上肢肘部关节点绕 x 轴的旋转角度 $\theta_{lx} \in [85^\circ, 95^\circ]$ 、右上肢肘部关节点绕 x 轴的旋转角度 $\theta_{rx} \in [0^\circ, 8^\circ]$ 时,根据捕捉的人体下肢动作数据逆向控制虚拟人体后退。虚拟人体的具体运动过程如下。

1) t 时刻操作人员 LCS_{hip} 相对于初始时刻的旋转角度记为 $[\alpha_{ix}(t), \alpha_{iy}(t), \alpha_{iz}(t)]$, $t + \Delta T$ 时刻旋转角度变化量记为 $[\Delta\alpha_{ix}(t), \Delta\alpha_{iy}(t), \Delta\alpha_{iz}(t)]$ 。当操作人员只能根据正前方显示屏幕对虚拟人体运动过程进行控制时,为了便于对虚拟人体大范围运动中的转身过程进行控制,设置 γ 为 $\Delta\alpha_i(t)$ 的增益系数,令 $\gamma = 3$ 。 $t + \Delta T$ 时刻,令:

$$\begin{cases} \beta_x(t + \Delta T) = \alpha_x(t) + \Delta\alpha_{ix}(t) \\ \beta_y(t + \Delta T) = \alpha_y(t) + \gamma\Delta\alpha_{iy}(t) \\ \beta_z(t + \Delta T) = \alpha_z(t) + \Delta\alpha_{iz}(t) \end{cases} \quad (2)$$

$[\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z]$ 的计算方法如下:

$$\begin{aligned} \alpha_x(t + \Delta T) &= \beta_x(t + \Delta T) \\ \alpha_y(t + \Delta T) &= \begin{cases} \beta_y(t + \Delta T), & \beta_y(t + \Delta T) \in [-180^\circ, 180^\circ] \\ & \text{and } \alpha_y(t) \in [-60^\circ, 60^\circ] \\ 180^\circ, & \beta_y(t + \Delta T) > 180^\circ \\ & \text{or } \alpha_y(t) > 60^\circ \\ -180^\circ, & \beta_y(t + \Delta T) < -180^\circ \\ & \text{or } \alpha_y(t) < -60^\circ \end{cases} \\ \alpha_z(t + \Delta T) &= \beta_z(t + \Delta T) \end{aligned} \quad (3)$$

2) 在控制虚拟人体前进的过程中,根据识别的人体下肢动作类型及其运动步幅 S_p ,对虚拟人体运动过程进行控制。当发现 t 时刻邻近的 T_1 时间段内操作人员有脚部第一次与地面接触或双脚交替

与地面接触时,对虚拟人体进行下一步运动后可能的 hip 点空间位置坐标 $[x', y', z']$ 进行预判。

$$\begin{cases} x' = x_{\text{hip}}(t) + S_p \sin(\alpha_y(t)) \\ y' = y_{\text{hip}}(t) \\ z' = z_{\text{hip}}(t) + S_p \cos(\alpha_y(t)) \end{cases} \quad (4)$$

当控制虚拟人体后退时,则为:

$$\begin{cases} x' = x_{\text{hip}}(t) - S_p \sin(\alpha_y(t)) \\ y' = y_{\text{hip}}(t) \\ z' = z_{\text{hip}}(t) - S_p \cos(\alpha_y(t)) \end{cases} \quad (5)$$

采用包围盒碰撞法,根据 $[x', y', z']$ 对虚拟人体下一步运动完成后可能出现的与其他虚拟人体或虚拟维修对象的碰撞进行分析。若虚拟人体与其他维修人员或虚拟物体出现碰撞或穿越现象,则在 t 时刻,停止虚拟人体的前进或后退动作;反之,则控制虚拟人体前进或后退。在控制虚拟人体前进的过程中,根据已捕获的人体行进或跑步的步幅运动数据,采用 hip 点的 $v_m(t) \cdot \sin(\alpha_y(t))$, $v_y(t)$, $v_m(t) \cdot \cos(\alpha_y(t))$, 以及其他人体下肢关节点相对于父关节点 LCS 各轴的旋转角度,基于正向运动学控制虚拟人体在虚拟环境中的前进过程;在控制虚拟人体后退的过程中,则根据相应的人体运动数据逆向控制虚拟人体进行后退运动。

3) 虚拟人体停止前进或后退运动。若操作人员肘部仍处于控制虚拟人体大范围运动状态、且操作人员下肢动作识别结果仍为行进或跑步, $[\beta_x, \beta_y, \beta_z]$ 与 $[\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z]$ 的更新方法与式(2)~(3)相同,但虚拟人体 hip 点的空间位置不再变化,其他关节点相对父关节点的运动与操作人员的运动状态相同;反之, $[\beta_x, \beta_y, \beta_z]$ 与 $[\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z]$ 的计算方法如下:

$$\begin{cases} \beta_x(t + \Delta T) = \alpha_x(t) + \Delta\alpha_{ix}(t) \\ \beta_y(t + \Delta T) = \alpha_y(t) + \Delta\alpha_{iy}(t) \\ \beta_z(t + \Delta T) = \alpha_z(t) + \Delta\alpha_{iz}(t) \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} \alpha_x(t + \Delta T) = \beta_x(t + \Delta T) \\ \alpha_y(t + \Delta T) = \beta_y(t + \Delta T) \\ \alpha_z(t + \Delta T) = \beta_z(t + \Delta T) \end{cases} \quad (7)$$

此时,根据操作人员 hip 点在运动捕捉环境

WCS 中的空间位置变化量,相应地控制虚拟人体在虚拟环境中 hip 点空间位置坐标的变化。同时,根据捕捉到的其它操作人员运动信息,驱动虚拟人体其他各关节点的运动。

(4) 当虚拟人体大范围运动状态结束后,根据运动捕捉系统和数据手套获取的人体各关节点运动信息,实时驱动虚拟人体运动,使得虚拟人体能完整模拟操作人员的动作过程。同时,根据应用需要,基于碰撞检测控制虚拟人体与虚拟产品、虚拟产品与虚拟产品间的交互操作控制,实现对人员在实际操作环境中对实际产品操作过程的仿真^[10]。

2 虚拟人体手部维修操作控制

采用光学运动捕捉设备获取操作人员运动数据,基于正向运动学可以实时驱动虚拟人体上肢运动。此时,虚拟人体上肢各关节点的运动角度与操作人员相应关节点的运动角度相同,可以较为逼真地仿真操作人员上肢的运动姿态。而在对虚拟装备进行维修操作的过程中,虚拟人体与维修工具、维修对象的交互主要是通过手部完成,根据运动捕捉数据,可以实时计算出虚拟人体手部在虚拟环境 WCS 中的空间位置坐标,但虚拟人体手部各关节点运动数据的获取常需要通过数据手套实现。通过采用数据手套捕捉操作人员手部各关节点的旋转角度信息,实时驱动虚拟人体手部各关节点运动,并根据虚拟人体手部的姿态、维修工具与维修对象的交互感知模型以及交互响应机制,实现对虚拟人体手部与维修工具或维修对象交互过程的控制^[11]。在操作人员进行虚拟维修操作过程中,由于虚拟人体手部(手指)、维修工具或维修部件碰撞检测包围盒大小及形状设置,手套缺少力反馈以及相对位置不易准确感知等原因,虚拟人员对工作或样机部件的获取往往不是十分顺利和自然,增加计算机智能感知和判断人员操作意图的能力,进而辅助人们对虚拟样机的维修操作,对提升虚拟维修系统的沉浸感和交互性具有很重要的意义。

2.1 虚拟人体基本工作手势

根据吉尔布雷斯提出的动素分析法,人员操作动作可由 18 个基本动素组成。对于不同的基本动素,可根据手部形态各关节的旋转角度及相邻手指间的夹角,实现对各基本动素的定义。通过数据手套实时获取操作人员手部各关节及相邻手指间的夹角,可以实时判断出操作人员手部的基本动素信息。在虚拟维修操作过程中,除检查、寻找、选择、计划及发现等辅助决策基本动素外,与人员手部操作相关的基本动素主要包括伸手、移物、握取、持住、装配、定位、使用、拆卸及放手 9 项内容。在虚拟维修操作过程中,与人体手部基本动素相关的虚拟人体基本工作手势如表 1 所示。

表 1 虚拟人体基本工作手势

Tab. 1 Basic working gestures of virtual human

序号	手势名称	手势状态	应用
1	抓取	五指逐渐弯曲	拿取零部件或维修工具
2	握持	五指弯曲握拢	持有零部件或维修工具运动
3	释放	五指自然展开	放置零部件或维修工具
4	操作	大拇指伸直,其余握拢	手握扳手、钳子操作
5	按压	食指伸直,其余握拢	按拨按钮、紧压小部件
6	拧	大拇指和食指微弯贴近,其余成半握状	拧动控制开关或徒手旋转螺丝

2.2 虚拟人体手部交互操作过程

在基于数据手套实现了对人体手部基本动素的定义和判断后,进一步对虚拟维修操作过程中人体手部的交互操作行为进行了研究。在虚拟维修操作过程中,人体手部的交互操作过程主要可分为人一工具交互、人一样机交互及人一工具一样机交互。其中,人一工具交互与人一样机交互过程均可包括人对工具或样机的拿取、转移及释放过程。在检测虚拟人体手部与被抓取对象交互感知区域发生碰撞后,在操作手势满足要求的条件下,虚拟人体实现对被抓取对象的获取;然后,在手势正确的前提下,确定手部位置对被抓取对象的约束,在手

部运动的过程中,如果手部及被抓取对象不与其他物体发生碰撞,则根据手部位置实现对被抓取对象空间位置的实时更新;最后,当被抓取对象被移动到预定区域后,虚拟人体手势改变,相互间约束关系解除,此时根据实际需求,对被抓取对象的姿态和位置进行更新和调整。在虚拟人体徒手对被操作对象进行维修操作时,在判断发生碰撞检测后,被操作对象与其他物体间的约束关系改变,此时根据虚拟人体手部动作进行各项操作,最终使得被操作对象空间位置、约束关系及其他操作的可执行状态发生变化。在人—工具一样机交互过程中,虚拟人体手部在获取了工具后将工具移动到维修操作位置,通过判断工具与被操作对象间的碰撞状态,改变操作对象与其他物体间的约束关系;通过手部的动作变化使得工具按照预定规程运动,实现对被操作对象空间位置、约束关系及其他操作的可执行状态的改变;在操作动作完成后,移动和释放工具位置,从而可以进行其他的操作任务。人体手部交互操作过程如图 4 所示。

在基于数据手套实现了对人体手部基本动素的定义和判断后,进一步对虚拟维修操作过程中人体手部的交互操作行为进行了研究。在虚拟维修操作过程中,人体手部的交互基于 5DT 数据手套及 Polhemus 公司的 PATRIOT 电磁式空间位置器,控制虚拟人体手部对扳手的拿取过程如图 5 所示。采用碰撞检测判断虚拟人体手部与扳手虚拟样机接触后,通过获取人员手部的姿态信息,判断手部处于何种基本动素状态,控制扳手虚拟样机跟随虚拟人体手部运动。

2.3 虚拟维修操作过程智能辅助方法

在装备的维修操作过程中,维修操作需根据装备的组成结构和操作规范来执行。因此随着维修操作过程的进行,人体双手部姿态及位置、与维修工作及维修对象操作关系都会发生规律性的变化。通过计算获得该规律性的变化,可以用于对当前虚拟维修操作之后的下一步维修操作进行智能提示和辅助操作。

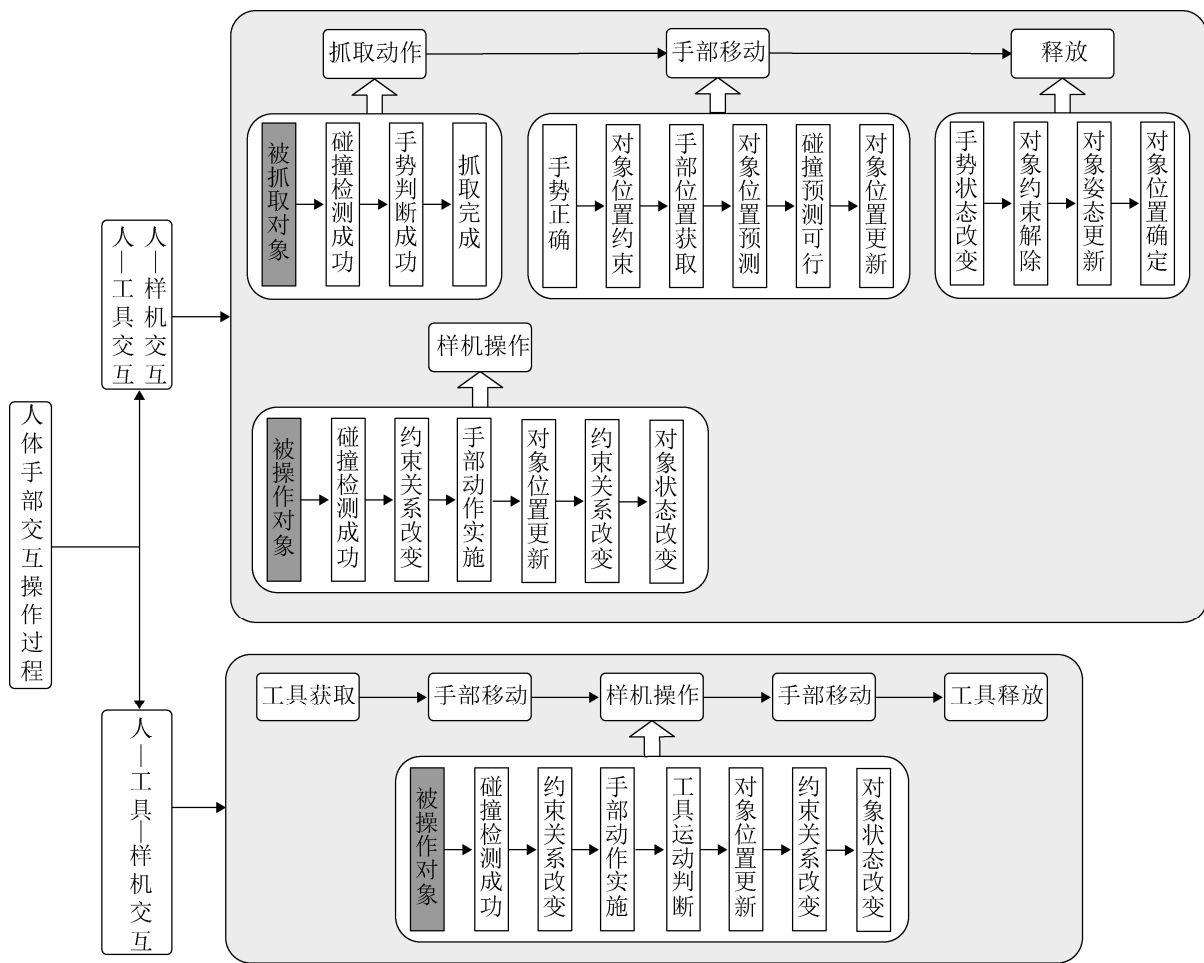


图 4 虚拟人体手部交互操作过程
Fig. 4 Human hand interactive operation processes



图 5 拿取扳手
Fig. 5 Taking a wrench

$S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$, S 称为维修操作状态的有限集。在对虚拟维修操作过程进行建模的过程中, 某一时刻虚拟人体双手部处于何种姿态, 两手间的距离, 此刻获取的维修工作和操作的维修对象即表示为该时刻的维修操作状态。 s_i ($i=1, 2, \dots, n$) 用于描述虚拟维修操作过程双手部姿态、相对位置, 及手部与各维修工作、各维修对象间的各种可能关系。

$V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$, V 称为手部操作动作的有限集, 对应于伸手、移物、握取、持住、装配、定位、使用、拆卸及放手等多种单手或双手操作动作。 v_j ($j=1, 2, \dots, m$) 用于描述虚拟维修操作过程的人员所有可能的手部操作动作。

动态贝叶斯网络(Dynamic Bayesian Network, DBN)能对不完整的数据集进行处理, 对不确定问题进行建模和分析, 在处理时序数据和表示多层次知识方面具有很好的理论优势。与隐马尔科夫模型(Hidden Markov Model, HMM)相比, DBN 在对时序数据进行建模的过程中更易扩展, 并且在网络节点数量增多的情况下具有更好的计算效率。为此, 构建的 DBN 模型来对维修操作过程进行预测和智能辅助, 其模型如图 6 所示。

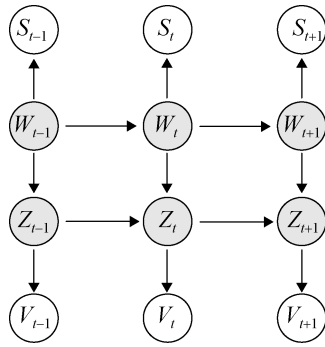


图 6 DBN 模型
Fig. 6 DBN Model

(1) S_t 表示 t 时刻维修操作状态的观测值, $S_t \in \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ 。

(2) V_t 表示 t 时刻手部操作动作的观测值, $V_t \in \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$ 。

(3) W_t 与 Z_t 分别表示 t 时刻的 2 个隐藏状态变量。 W_t 的状态量表示为 w_1, w_2, \dots, w_u , u 为状态数; Z_t 的状态量表示为 z_1, z_2, \dots, z_r , r 为状态数。其中, $W_t \in \{w_1, w_2, \dots, w_u\}$ 和 $Z_t \in \{z_1, z_2, \dots, z_r\}$ 。

设置 W_t 与 Z_t 的初始状态概率分布, 将维修操作过程中 S_t 与 V_t 的观测值时序序列数值化, 作为训练数据。基于 Expectation Maximization 算法可计算出 W_t 与 Z_t 的状态转移概率矩阵以及 S_t 与 V_t 的观测值概率分布矩阵, 基于交叉树推理算法可实现对维修操作状态 S_{t+1} 和手部操作变化 V_{t+1} 的预测。

初始时刻, 根据装备的维修操作规范制定维修操作过程中 S_t 与 V_t 的数据库, 训练虚拟维修操作过程的 DBN 模型。在操作人员进行虚拟维修操作过程中, t 时刻完成了手部操作变化 V_t 后, 根据此时的维修操作状态和手部操作变化的时序观测值序列预测下一步的维修操作状态 S_{t+1} 和手部操作变化 V_{t+1} , 可以分别通过采用文本和图片的形式提示操作人员下一步最可能的手部操作动作和维修操作状态, 通过颜色变化提示操作人员下一步的操作对象和所需的维修工作, 改变其包围盒形状或大小便于虚拟人体手部、维修工作和操作对象之间的交互过程。然后通过不断累积的操作人员实际维修操作数据更新数据库, 并改进维修操作的 DBN 模

型, 可以逐步提高智能辅助过程的准确率, 并更适应操作人员的维修操作过程习惯。虚拟维修操作智能辅助的实现过程如图 7 所示。

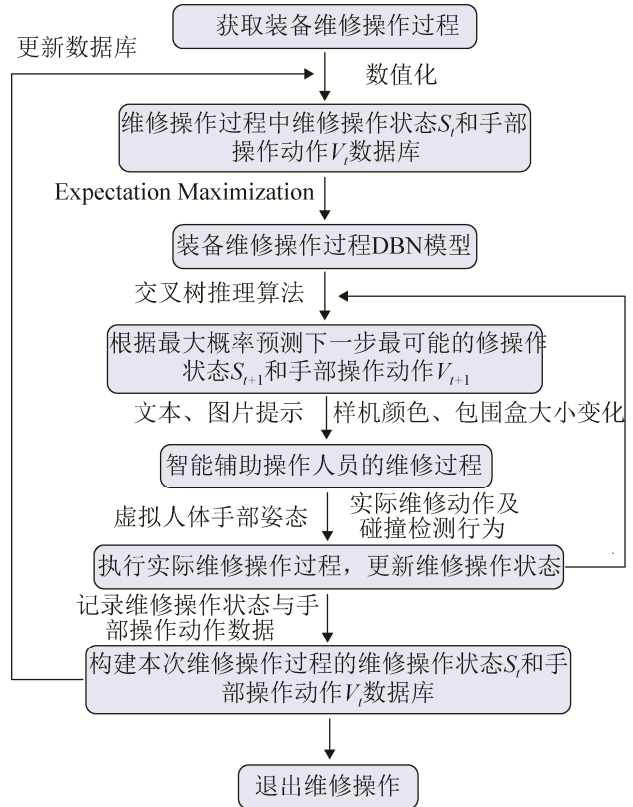


图 7 维修操作的智能辅助过程

Fig. 7 Intelligent aided process for maintenance operations

3 实例验证

以某液压缸协同式虚拟维修操作仿真平台为例, 对提出的有限运动捕捉范围下的虚拟人维修操作过程控制方法进行验证。该液压缸主要包括缸筒、油缸基座、一级油缸 I、二级油缸 II、紧固螺母、紧固螺栓、油管、密封圈及支耳等零部件。在长时间的使用过程中, 由于零部件的损坏、磨损或者变形等原因, 某二级液压缸在工作过程中容易出现液压油泄露及工作压力不足等问题。当该液压缸不能正常工作时, 需要 2 名以上维修操作人员对其进行拆卸、修理或更换故障部件及装配等维修操作, 采用的维修工具主要包括一字槽螺丝刀、力矩扳手及固定扳手等。针对维修操作人员的日常维修操作训练, 对该液压缸的协同式虚拟维修操作仿真

平台进行了设计与开发^[12-13]。

(1) 在 Microsoft Visual Studio 2010 编程环境中对人体运动数据获取及下肢动作识别模块进行开发。基于 OptiTrack 系统软件开发包实现对操作人员运动数据实时获取的同时, 基于证据理论和 SVM 实现对人体下肢动作的实时识别。

(2) 设计与开发液压缸协同式虚拟维修操作仿真平台。首先, 根据液压缸维修操作过程对虚拟环境进行设计, 便于操作人员控制虚拟人体进行维修操作活动。其次, 定义虚拟人体手部姿态描述信息模型, 建立维修工具与液压缸各零部件的交互感知模型, 构建虚拟人体手部与维修工具间、虚拟人体手部与液压缸各零部件间的交互响应处理机制, 完善虚拟人员协同维修操作过程模型, 构建液压缸

虚拟维修操作过程的 DBN 模型。最后, 基于人体运动数据获取及下肢动作识别、5DT 数据手套信息获取与处理、维修操作过程控制及协同式虚拟维修仿真场景等多功能模块, 实现对该液压缸协同式虚拟维修操作仿真平台的开发。液压缸协同式虚拟拆卸操作过程如图 8 所示。

实验中, 基于 OptiTrack 被动式光学人体运动捕捉系统及 5DT 数据手套, 较好地控制了虚拟人体在虚拟环境中的运动; 虚拟人体的维修操作过程符合维修操作任务的执行顺序及维修操作规范要求, 能较好地反映实际维修操作过程, 且实时性好、交互性与感知性强。利用该平台, 可以实现对操作人员维修操作技能的培训, 并可节约操作人员维修训练成本。

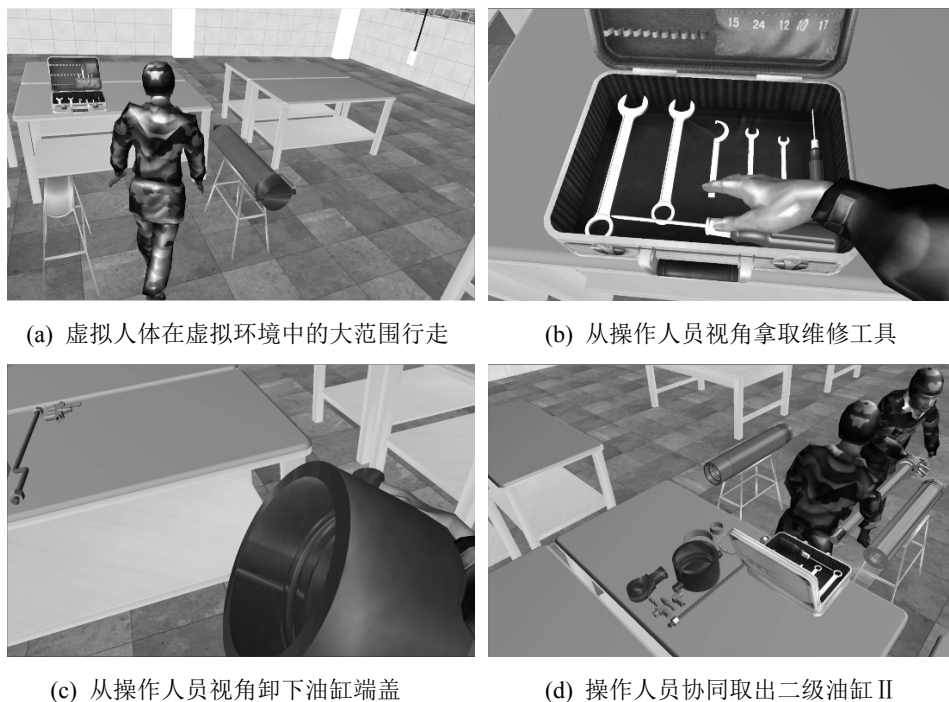


图 8 某液压缸协同式虚拟拆卸操作过程

Fig. 8 Collaborative virtual disassembly operation process of a hydraulic cylinder

4 结论

由于光学运动捕捉设备捕捉范围有限, 为了实现对虚拟人体维修操作过程的准确控制, 对协同虚拟维修中的虚拟人体维修操作过程控制进行了研究。首先, 提出在采用光学运动捕捉设备对维修操

作人员的下肢动作进行实时捕捉和识别的基础上, 根据识别结果控制虚拟人体进行大范围运动, 虚拟人体到达维修操作位置后, 再根据运动捕捉数据进行运动。其次, 针对维修操作过程中的虚拟人体手部运动控制, 分析了虚拟人体的手部交互过程, 提出了一种基于动态贝叶斯网络的维修操作智能辅

助方法,实现了对虚拟人体维修过程的控制。最后,以某液压缸协同式虚拟维修操作仿真平台为例,验证了方法的有效性。该方法可以有效控制虚拟人体的维修操作过程,虚拟人体能正确地根据操作人员意图进行大范围运动和相关的维修操作活动,具有实时性好、交互性与感知性强等优点。

参考文献:

- [1] 高翔, 安辉, 陈为, 等. 移动增强现实可视化综述[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2018, 30(1): 1-8.
Gao Xiang, An Hui, Chen Wei, et al. A Survey on Mobile Augmented Reality Visualization[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2018, 30(1): 1-8.
- [2] 文国军, 夏雨, 王玉丹, 等. 基于 Unity3D 的水平定向钻机虚拟实训系统设计[J]. 系统仿真学报, 2020, 32(5): 801-807.
Wen Guojun, Xia Yu, Wang Yudan, et al. Design of Virtual Training System for Horizontally Oriented Drill Based on Unity3D[J]. Journal of System Simulation, 2020, 32(5): 801-807.
- [3] 胡凌燕, 史康柏, 张碧纯, 等. 在线修正虚拟仿真预测的遥操作机器人系统[J]. 系统仿真学报, 2020, 32(2): 247-254.
Hu Lingyan, Shi Kangbai, Zhang Bichun, et al. Tele-robot Control System with Online Virtual Simulation Prediction[J]. Journal of System Simulation, 2020, 32(2): 247-254.
- [4] 高杰, 刘鹏, 李蔚清. 基于质量评价的运动跟踪数据融合方法[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2019, 42(5): 646-650, 720.
Gao Jie, Liu Peng, Li Weiqing. Data Fusion Method of Motion Tracking Based on Quality Evaluation[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2019, 42(5): 646-650, 720.
- [5] 杨华, 苏势林, 闫雨奇, 等. 基于关键姿态约束的人体运动序列插值生成[J]. 沈阳航空航天大学学报, 2019, 36(3): 59-65.
Yang Hua, Su Shilin, Yan Yuqi, et al. Human Motion Sequence Interpolation and Generation Based on Key-pose Constraints[J]. Journal of Shenyang Aerospace University, 2019, 36(3): 59-65.
- [6] 张青, 郑岩, 郭庆, 等. 航空发动机设备拆装快速装配仿真研究[J]. 计算机仿真, 2018, 35(3): 257-262.
Zhang Qing, Zheng Yan, Guo Qing, et al. Simulation Research on Rapid Assembly and Disassembly of Aeroengine Based on Motion Capture Equipment[J]. Computer Simulation, 2018, 35(3): 257-262.
- [7] Hyun D J, Lim H, Park S, et al. Walking propulsion generation in double stance by powered exoskeleton for paraplegics[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2019, 116: 24-37.
- [8] 梁丰, 张志利, 李向阳, 等. 人体运动捕捉过程中的人体下肢动作识别[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2015, 27(12): 2419-2427.
Liang Feng, Zhang Zhili, Li Xiangyang, et al. Simulation Research on Rapid Assembly and Disassembly of Aeroengine Based on Motion Capture Equipment[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2015, 27(12): 2419-2427.
- [9] 梁丰, 张志利, 李向阳, 等. 协同虚拟维修中体感交互控制技术研究[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2019.
Liang Feng, Zhang Zhili, Li Xiangyang, et al. Research on Somatosensory Interactive Control Technology in Collaborative Virtual Maintenance[M]. Xi'an: Northwest Industrial University Press, 2019.
- [10] 姜盛乾. 基于虚拟现实技术的装配及人因评价研究[D]. 长春: 吉林大学, 2019.
Jiang Shengqian. Research on Assembling and Human Factor Evaluation Based on Virtual Reality Technology[D]. Changchun: Jilin University, 2019.
- [11] 杨子辉. 大规模辐射场景三维实时仿真关键技术研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2016.
Yang Zihui. Study on Key Technologies of Three-dimensional Real-time Simulation for Large-scale Radiation Scenario[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2016.
- [12] 李彬, 崔汉国, 李正民, 等. 基于共享子网合成 Petri 网的协同虚拟维修系统[J]. 中国修船, 2015, 28(5): 45-49.
Li Bin, Cui Hanguo, Li Zhengmin, et al. Collaborative Virtual Maintenance System Based on Synthesis of Petri Nets Sharing a Kind of Subnet[J]. China Shiprepair, 2015, 28(5): 45-49.
- [13] 徐文胜, 武博, 蒋坚鸿. 武器装备虚拟维修训练系统行为树设计与实现[J]. 系统仿真学报, 2018, 30(7): 2722-2728.
Xu Wensheng, Wu Bo, Jiang Jianhong. Design and Realization of Behavior Tree in Weapon Equipment Virtual Maintenance Training System[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(7): 2722-2728.