

12-21-2022

Fast generation Method of Multi-sensing Channel Fusion Virtual Experiment

Jingwei Deng

1.School of Electromechanical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China; 1003860714@qq.com

Hanwu He

2.Guangdong Polytechnic of Industry and Commerce, Guangzhou 510510, China;

Yueming Wu

1.School of Electromechanical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China; wuyueming@gdut.edu.cn

Jianhao Su

1.School of Electromechanical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, 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.

Fast generation Method of Multi-sensing Channel Fusion Virtual Experiment

Abstract

Abstract: Aiming at the low development efficiency and single experience in traditional virtual experiments, a rapid generation method of multi-sensing channel fusion virtual experiment visualization is proposed. The experimental steps and sequence of experimental steps of the virtual experiment are defined. *A parameterized description method of experimental elements based on Petri net is proposed to describe the sequence of experimental steps, which breaks through the constraints the established procedure steps of traditional virtual experiments and supports the exploratory virtual experiments. The visual expression method of the routing graph and the conversion method between the routing graph and the Petri net are proposed,* in which users can quickly edit the sequence of experimental steps by editing the routing graph. *The feedbacks of the two channels of smell and temperature are incorporated, to realize the virtual realization of the fusion of multi-sensing channels of sight, hearing, smell and touch.* To verify the proposed method, a prototype system is developed, and the thermite reaction experiment is taken as an example to introduce the generation process. The results show that the visual rapid editing method is effective and feasible for the editing of virtual experiments.

Keywords

virtual experiment, Petri net, routing graph, multi-channel fusion, generation method

Recommended Citation

Jingwei Deng, Hanwu He, Yueming Wu, Jianhao Su. Fast generation Method of Multi-sensing Channel Fusion Virtual Experiment[J]. Journal of System Simulation, 2022, 34(12): 2639-2648.

多感知通道融合虚拟实验的快速生成方法

邓景威¹, 何汉武², 吴悦明^{1*}, 苏健豪¹

(1. 广东工业大学 机电工程学院, 广东 广州 510006; 2. 广东工贸职业技术学院, 广东 广州 510510)

摘要: 针对传统虚拟实验存在的开发效率低、体验单一等问题, 提出多感知通道融合虚拟实验的可视化快速生成方法。对虚拟实验的实验步骤、实验步骤序列进行定义。提出基于Petri网的实验元素参数化描述方法对实验步骤序列进行描述, 突破传统虚拟实验一步步按既定程序走的约束, 支持建立探究式虚拟实验。提出路由图的可视化表达方法及其与Petri网之间的转换方法, 使用户能通过编辑路由图的方式实现实验的快速开发, 融入了嗅觉与温感两个通道的反馈, 使实现视、听、嗅、触多感知通道融合的虚拟实现成为可能。为验证所提出的方法, 开发了相应的原型系统, 并以铝热反应实验为例, 介绍生成过程。结果表明: 该可视化快速编辑方法对虚拟实验的编辑有效且可行。

关键词: 虚拟实验; Petri网; 路由图; 多通道融合; 生成方法

中图分类号: TP391

文献标志码: A

文章编号: 1004-731X(2022)12-2639-10

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.21-0009

Fast generation Method of Multi-sensing Channel Fusion Virtual Experiment

Deng Jingwei¹, He Hanwu², Wu Yueming^{1*}, Su Jianhao¹

(1. School of Electromechanical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China;

2. Guangdong Polytechnic of Industry and Commerce, Guangzhou 510510, China)

Abstract: Aiming at the low development efficiency and single experience in traditional virtual experiments, a rapid generation method of multi-sensing channel fusion virtual experiment visualization is proposed. The experimental steps and sequence of experimental steps of the virtual experiment are defined. A parameterized description method of experimental elements based on Petri net is proposed to describe the sequence of experimental steps, which breaks through the constraints the established procedure steps of traditional virtual experiments and supports the exploratory virtual experiments. The visual expression method of the routing graph and the conversion method between the routing graph and the Petri net are proposed, in which users can quickly edit the sequence of experimental steps by editing the routing graph. The feedbacks of the two channels of smell and temperature are incorporated, to realize the virtual realization of the fusion of multi-sensing channels of sight, hearing, smell and touch. To verify the proposed method, a prototype system is developed, and the thermite reaction experiment is taken as an example to introduce the generation process. The results show that the visual rapid editing method is effective and feasible for the editing of virtual experiments.

Keywords: virtual experiment; Petri net; routing graph; multi-channel fusion; generation method

收稿日期: 2021-01-05

修回日期: 2021-04-07

基金项目: 国家重点研发计划重点专项(2018YFB1004902)

第一作者: 邓景威(1995-), 男, 硕士生, 研究方向为虚拟现实与可视化。E-mail: 1003860714@qq.com

通讯作者: 吴悦明(1979-), 男, 博士生, 高级实验师, 研究方向为虚拟现实及其工业可视化应用。E-mail: wuyueming@gdut.edu.cn

引言

传统实验教学需要克服场地、设备、人力短缺的问题。虚拟现实技术在实验教学领域得到广泛的应用,虚拟实验巧妙运用多种交互手段,提高真实感,增强实验教学效果^[1-6]。

现有的虚拟实验系统^[7-8]大多需要定制化开发,开发效率低,成本高且需要有较高的编程能力。通用性编辑系统的产生,为解决虚拟实验系统开发所遇到的问题提供了解决途径。Coelho H等^[9]设计的编辑工具支持对嗅觉和触觉模块的可视化编辑,编辑的时候可佩戴VR头显,在VR环境下用手柄完成VR应用的设计。Mujika A等^[10]设计的编辑系统应用于虚拟机械拆装训练,编辑系统分为编辑工具和模拟器,编辑工具通过绘制拓扑图来可视化编辑拆装序列,并将拆装序列存储在XML文件中,模拟器读取XML文件后即可开展拆装训练。

但是,现有的编辑工具仍存在以下的不足:
① 大多缺乏对多种通道融合的可视化编辑功能;
② 虚拟实验对虚拟现实资源、实验操作规范性有特殊要求,针对虚拟实验特点而设计的编辑工具研究尚且不足;
③ 只能编辑简单的操作序列,对较复杂的操作序列编辑的能力不足。

为此,本文构建基于Petri网的实验步骤序列的参数化模型,提出一种多感知通道融合的虚拟实验生成方法,以解决目前存在的交互通道单一、无法进行复杂操作序列编辑等问题。该编辑方法允许嗅觉、温感、声音多种通道的可视化编辑和呈现;用户可以通过虚拟实验资源库共享实验资源,简化开发过程;通过路由图的可视化设计实现多种逻辑复杂的实验步骤序列,实现探究式虚拟实验的快速编辑。

1 虚拟实验的描述方法

1.1 虚拟实验元素的定义及其关系

一个虚拟实验由多个实验步骤(简称步骤)通过

多种逻辑序列关系排列组成,实验步骤序列(简称步骤序列)描述的是这种逻辑序列关系,如图1所示。

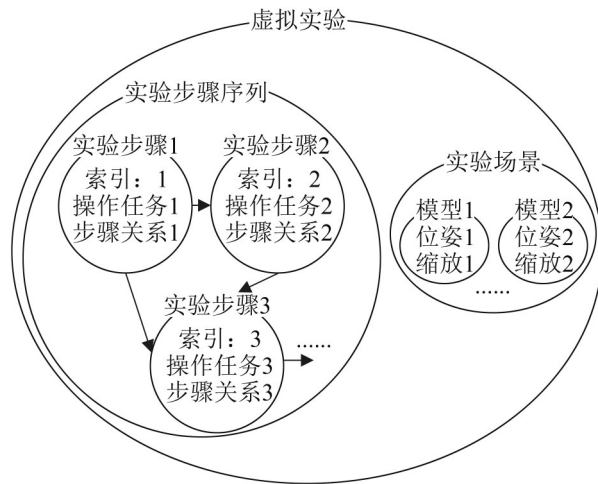


图1 实验步骤、实验步骤序列和虚拟实验三者间的关系
Fig. 1 Relationship between experimental procedures, sequence of experimental procedures and virtual experiments

步骤的完成条件指的是场景中所有物体的位姿、碰撞等状态满足某些参数要求,如“点燃火柴”步骤的完成条件是火柴触碰到火柴盒。已完成步骤指实验者已经完成的事,满足完成条件的当前可操作步骤会成为已完成步骤,否则均为未完成步骤。步骤的可操作条件指操作该步骤前应该先完成的步骤都已完成,且不应该完成的步骤都未完成,如“点燃镁条”步骤的可操作条件是“点燃火柴”步骤已完成。当前可操作步骤指实验者当前可以操作的事,满足可操作条件的未完成步骤会成为当前可操作步骤,否则均为当前不可操作步骤。

实验者完成一个虚拟实验的过程:正确操作实验场景中的物体,使物体的状态满足当前可操作步骤的完成条件要求,即完成当前可操作步骤,同时实验场景中出现相应的实验现象。随后,其他某些未完成步骤的可操作条件满足,成为当前可操作步骤。重复这种流程,直到所有必要的步骤都操作完成。以铝热反应实验中先“点燃火柴”再“点燃镁条”的过程为例,开始时,“点燃火

柴”为当前可操作步骤,“点燃镁条”的可操作条件不满足,故“点燃镁条”为当前不可操作步骤,此时这 2 个步骤均为未完成步骤。当“点燃火柴”的完成条件满足后,成为已完成步骤的同时也成为当前不可操作步骤,随后“点燃镁条”的可操作条件满足,变为当前可操作步骤;“点燃镁条”还未操作完成,故为未完成步骤。最后当“点燃镁条”完成时,所有步骤均为已完成步骤,整个实验操作完成。

1.2 实验步骤的定义

实验操作动作具有规律性和规范性,实验中常用的实验操作动作包括抓、放、扭、压、倒等。实验步骤指用一组连贯的实验操作动作完成一件事件,常有的实验步骤包括用手抓物品放置在指定位置,用药勺取试剂放入烧杯,放下手中的物品等。实验步骤可以抽象地描述为

$$p=\{t, f\}$$
 (1)

式中: t 为操作任务参数,包括操作动作、对象物体、目标位姿、使用工具、提示信息等,表示步骤的完成条件或实验现象; f 为步骤序列式(简称步骤),分为父步骤式 f^p 和子步骤式 f^c ,表示步骤的可操作条件,决定该实验步骤与其他步骤间的逻辑顺序关系。其中 f^p 为进行操作 p 前应该满足的条件, f^c 为操作完成操作 p 后应该满足的条件。 t 和 f 共同决定实验步骤序列。

实际实验中不同的操作动作会对应不同的参数指标,根据操作动作的不同对 t 分类, t 的可选参数指标如表 1 所示。操作动作不同, t 的可选参数指标会不同,如某步骤 p ,若其 t 的操作动作为“物体移近”,则 t 的可选参数指标为“对象物体”、要移近的“目标位姿”、移动物体时用的“工具”及步骤“提示信息”。

根据是否需要实验者操作才能完成,将操作动作分为需要操作和无需操作两类。操作动作类型为需要操作的步骤 p ,其 t 表示完成条件,在步骤 p 为当前可操作步骤的前提下,当虚拟场景中

物体的位姿等状态都满足 t 所有参数指标的条件时,认为该步骤操作完成,成为已完成步骤。如某步骤 p ,其 t 的操作动作为“移动物体”,在该步骤当前可操作的前提下,若实验者使用“工具”将“对象物体”搬到指定的“目标位姿”,则认为步骤 p 完成。操作动作类型为无需操作的步骤 p ,其 t 表示实验现象,而完成条件为空,即当这类实验步骤的可操作条件满足,成为当前可操作步骤时,无需实验者做任何操作,其完成条件也会立即满足,成为已完成步骤和当前不可操作步骤,同时根据 t 出现相应的实验现象,如表 2 所示。如某步骤 p 的 t 的操作动作为“释放热量”,当该步骤的可操作条件满足时,完成条件也立即满足,成为已完成步骤,同时温感呈现装置的风扇开始工作,功率为“风扇功率”,温感呈现装置开始释放温度值为“温度”的热风并持续“持续时长”的时间。虚拟实验中融合了嗅觉通道和温感通道的呈现,操作动作为“散发气味”时由嗅觉呈现装置^[11]散发特定的气味,操作动作为“释放热量”时由温感呈现装置^[12]吹出特定温度的热风,如图 2~3 所示。

表 1 t 的可选参数指标
Table 1 Some optional parameters of t

操作动作		参数指标
需要操作	移动物体	
	物体移离	对象物体、目标位姿、工具、提示信息
	物体移近	
	倾倒物体	对象物体、目标位姿、工具、倾倒角、提示信息
无需操作	显示物体	对象物体、显示位姿、提示信息
	隐藏物体	对象物体、提示信息
	出现特效	特效对象、显示位姿、持续时长、特效尺寸
	出现文字	文字内容、显示位姿、持续时长、文字尺寸
	物体动画	对象物体、目标位姿、动画速度
	播放视频	视频对象、播放时段、持续时长
	发出声音	声音对象、目标位姿、持续时长、声音大小
	散发气味	气味种类、持续时长、气味浓度、风扇功率
	释放热量	温度、持续时长、风扇功率

表 2 步骤完成后出现的实验现象
Table 2 Experimental phenomenon after step is completed

操作动作	实验现象
移动物体	-
需要	物体移离
操作	物体移近
倾倒物体	-
显示物体	对象物体从不可见状态变为可见状态
隐藏物体	对象物体从可见状态变为不可见状态
出现特效	特效对象出现在目标位姿,并持续一定时长
出现文字	文字对象出现在目标位姿,并持续一定时长
无需	对象物体朝目标位姿以一定速度移动和旋转
操作	播放视频 在目标位姿播放一段视频
	发出声音 在目标位姿出现一段声音,支持立体声效果
	散发气味 嗅觉呈现装置散发指定气味
	释放热量 温感呈现装置释放指定温度的热风

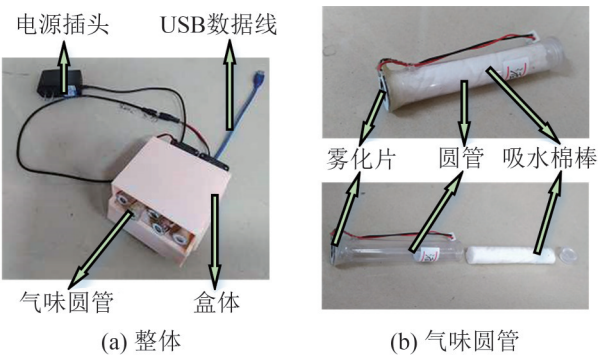


图 2 嗅觉呈现装置
Fig. 2 Olfactory presentation device



图 3 温感呈现装置
Fig. 3 Temperature sensing device

1.3 基于 Petri 网的实验步骤序列描述方法

本文使用 Petri 网对实验步骤序列作描述。Petri 网中库所对应 p 的索引, 库所中的数字为 p 的索引号; 变迁 t 的前集为操作任务参数 t^f ; 变迁的后集为 t^b , 其中 t^b 的使能情况由步骤式 f^p 条件和 f^c 条件的满足情况决定, 需要注意 f^p 为其所属步骤 p 的父步骤式, 但 f^c 一般不是其所属步骤 p 的子步骤式, 而是输入 t^b 方向的有向弧连接的变迁所属步骤的子步骤式; 库所、变迁间的有向弧由 f 决定, 表示某种逻辑顺序关系。实验步骤序列可描述为

$$P=\{p_1, p_2, \cdots, p_i, \cdots, p_n\}=\{T, F\} \quad (2)$$

式中: $T=\{t_1, t_2, \cdots, t_i, \cdots, t_n\}$; $F=\{f_1, f_2, \cdots, f_i, \cdots, f_n\}$; p_i 为特定的实验步骤, 其索引号为 i ; t_i 、 f_i 分别为实验步骤 p_i 的操作任务参数和步骤式。可将 Petri 网作转换, 将变迁的前集和后集分开, 如图 4 所示。注意变迁的前集 t_1^f 和变迁的后集 t_2^b 下标索引号的不同。下文提到的 Petri 网均指转换后的 Petri 网。

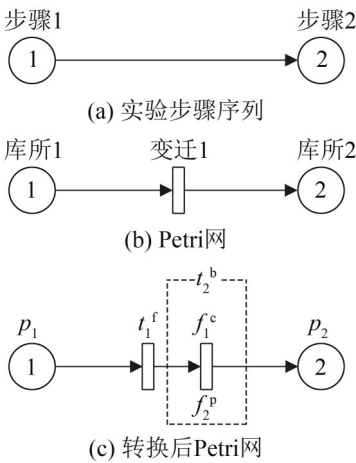


图 4 实验的步骤序列与其 Petri 网、转换后的 Petri 网的对应关系
Fig. 4 Corresponding relationship between sequence of steps in experiment and its Petri net and converted Petri net

图 4 中, 假设 p_1 为当前可操作步骤, 若 p_1 的操作动作类型为需要操作, 当实验场景中所有物

体的状态都满足 t_1^f 时,变迁的前集 t_1^f 使能,否则 t_1^f 不使能;若 p_1 的操作动作类型为无需操作, t_1^f 保持使能。 t_2^b 的使能情况由步骤 p_1 的子步骤式 f_1^c 条件和步骤 p_2 的父步骤式 f_2^p 条件的满足情况决定。规定子步骤式的优先级高于父步骤式,若 f_1^c 不为空,当 f_1^c 条件满足时, t_2^b 使能,否则 t_2^b 不使能;若 f_1^c 为空且 f_2^p 不为空,当 f_2^p 条件满足时, t_2^b 使能,否则 t_2^b 不使能;当 f_1^c 和 f_2^p 均为空时, t_2^b 使能,如图5所示。当 t_1^f 使能时,认为 p_1 已完成操作,成为已完成步骤,否则 p_1 未完成;当 t_2^b 使能时, p_2 的可操作条件满足,认为当前可以开始操作步骤 p_2 ,否则 p_2 不可操作。

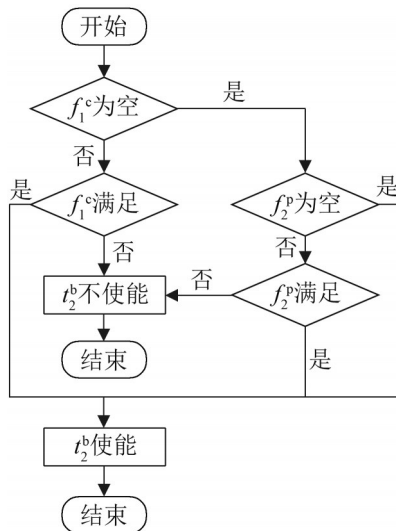


图5 由 f_1^c 和 f_2^p 判断 t_2^b 是否使能
Fig. 5 Determine whether t_2^b is enabled by f_1^c and f_2^p

对于步骤 p_i , f_i^c 和 f_i^p 均由步骤的索引号和逻辑运算符“&”“|”“!”和符号“()”组成。逻辑运算符可对步骤的索引号进行运算,也可对由步骤的索引号组成的表达式进行运算。定义含双目逻辑运算符“&”的表达式满足函数关系:

$$t_i^b = G(f_i) = G(j \& k) \quad (3)$$

式中: j 和 k 为索引号;函数 $t_i^b = G(f_i)$ 为 f_i 的满足情况到 t_i^b 使能情况的一种映射关系; $G(j \& k)$ 为 p_j 和 p_k 均操作完成后, t_i^b 使能,否则不使能。其中 f_i 可以表示子步骤式 f_i^c 或父步骤式 f_i^p 。同理,含双

目运算符“|”的表达式满足函数关系:

$$t_i^b = G(f_i) = G(j | k) \quad (4)$$

式中: $G(j | k)$ 为步骤 p_j 或步骤 p_k 操作完成后, t_i^b 使能,否则不使能。含单目运算符“!”的表达式满足函数关系:

$$t_i^b = G(f_i) = G(!j) \quad (5)$$

式中: $G(!j)$ 为步骤 p_j 未操作完成时, t_i^b 使能,否则不使能。符号“()”可限制表达式的优先级,假设有

$$t_i^b = G(f_i) = G(j | (k \& l)) \quad (6)$$

式中: $G(j | (k \& l))$ 为步骤 p_k 和步骤 p_l 都完成,或步骤 p_j 完成这2种情况的任一种发生, t_i^b 均可使能,否则不使能。符号“()”的优先级最高,其次是运算符“!”,最后是运算符“&”“|”,运算符“&”“|”的优先级相同。表达式中如果存在优先级相同的运算符或符号,则靠近表达式左侧的运算符或符号先计算,右侧的运算符或符号后计算,依此类推。

父步骤式可实现步骤之间的顺序、并发、选择、共生等关系。当所有步骤的子步骤式均为空时,由图5可知步骤的可操作条件均由父步骤式决定,父步骤式及其对应的Petri网如表3所示。

然而仅靠父步骤式不容易描述一些步骤的可操作条件。以表3中的并发关系为例,如果步骤序列要求 p_2 完成后只能操作 p_4 ,而不能操作本该可以操作的 p_3 ,当 p_4 操作完成后,原本可操作的 p_3 又允许操作。这种步骤序列如果仅用父步骤式描述,则 f_3^p 为 $1 \& !(2 \& 4)$,该父步骤式较为复杂。当步骤数量很大,步骤序列复杂时,父步骤式会非常长,且编写难度大。本文提出用子步骤式 f_i^c 表示完成步骤 p_i 后应该先操作的步骤。规定当含非空子步骤式 f_i^c 的 p_i 操作完成时, f_i^c 所涉及的步骤全部变为当前可操作步骤,其他父步骤式条件满足、本该可以操作的步骤暂时定为不可操作,直到 f_i^c 条件满足后,那些被暂时定为不可操作的步骤才会重新定为当前可操作步骤。表3的并发

关系中，设 p_2 的子步骤式是4，其他步骤的步骤式保持不变，则表3中的并发关系可以转为如表4所示的关系。

操作完成 p_1 后，实验者可选择先操作 p_2 或先操作 p_3 ，假如先操作完 p_2 ，则接下来只能操作 p_4 而不能操作 p_3 ，操作完 p_4 后， p_3 又重新设为可操

作步骤，实验者可依次完成 p_3 、 p_5 。利用步骤式能实现实验步骤之间复杂的逻辑顺序关系，虚拟实验不再局限于一步步顺序地进行，较好地模拟实际实验中各种操作规范和要求，利用该生成方法可进行探究式实验的创作开发。步骤式的具体应用案例将在3.2节介绍。

表3 子步骤式为空时，由父步骤式决定步骤的可操作条件下的Petri网

Table 3 When child step is empty, parent step determines the Petri net under the operable condition of the step			
关系类型	Petri网	父步骤式	父步骤式描述
顺序关系		f_1^p 为空	开始实验时 p_1 即可操作
		f_2^p 为 1	p_1 完成后 p_2 才可操作
		f_3^p 为 2	p_2 完成后 p_3 才可操作
并发关系		f_1^p 为空	开始实验时 p_1 即可操作
		f_2^p 为 1	p_1 完成后 p_2 才可操作
		f_3^p 为 1	p_1 完成后 p_3 才可操作
		f_4^p 为 2	p_2 完成后 p_4 才可操作
选择关系		f_1^p 为空	开始实验时 p_1 即可操作
		f_2^p 为 1	p_1 完成后 p_2 才可操作
		f_3^p 为 1	p_1 完成后 p_3 才可操作
		f_4^p 为 2 3	p_2 或 p_3 完成后 p_4 才可操作
		f_1^p 为空	开始实验时 p_1 即可操作
		f_2^p 为 1&!3	p_1 完成且 p_3 未完成时 p_2 才可操作
共生关系		f_1^p 和 f_2^p 为空	开始实验时 p_1 、 p_2 即可操作
		f_3^p 为 1	p_1 完成后 p_3 才可操作
		f_4^p 为 2	p_2 完成后 p_4 才可操作
		f_5^p 为 3&4	p_3 和 p_4 完成后 p_5 才可操作

表4 加入子步骤式后的并发关系
Table 4 Parallel relationship after adding child step

Petri网	步骤式	步骤式描述
	f_1^p 为空	开始实验 p_1 即可操作
	f_2^p 为 1	p_1 完成后 p_2 才可操作
	f_3^p 为 1	p_1 完成后 p_3 才可操作
	f_2^c 为 4	p_2 完成后只能先做 p_4
	f_3^c 为 5	p_3 完成后只能先做 p_5

2 基于路由图的实验步骤序列可视化表达

1.3 小节提到的转换后 Petri 网由于图元较多, 不利于虚拟实验步骤序列的可视化快速编辑。为简化步骤序列的可视化编辑过程, 提出以路由图的形式对步骤序列进行编辑, 转换后的 Petri 网与路由图的对应关系如图 6 所示。相比转换后的 Petri 网, 路由图将变迁的前集和变迁的后集与库所作相应的合并, 合并后称为节点。1 个节点表示 1 个实验步骤, 简化的路由图节点中的数字为步骤的索引号, 2 个节点间的有向弧简单地表示 2 个节点存在某种直接关联。1 个步骤所有的信息包括索引号、操作任务参数和步骤式, 都放到路由图同一个节点中, 成为节点的可选参数(简称节点参数), 一起进行编辑、存储和读取。虚拟实验创作过程中以简化的路由图形式对步骤序列进行可视化编辑, 下文提到的路由图均指简化的路由图。

创作者创作虚拟实验步骤序列的过程: 生成节点, 让每个节点对应一个步骤, 根据实际实验步骤的要求设置节点参数, 系统会根据节点参数中的步

骤式自动生成节点间的有向弧, 最终完成路由图的编辑。根据步骤的操作任务参数的操作动作类型的不同, 对节点参数分类, 如表 5 所示。

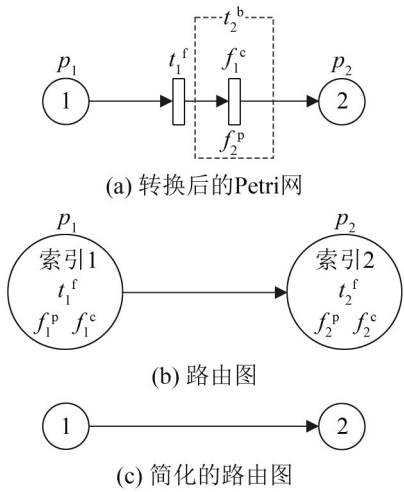


图 6 转换后的 Petri 网与路由图的对应关系
Fig. 6 Correspondence between transformed Petri net, routing graph and simplified routing graph

创作者完成路由图的编辑后, 可对路由图信息进行存储。路由图各个节点的节点参数以 XML 语言格式存储在一个 XML 文本文件内, 该文本文件称为步骤文件。路由图的一个节点的节点参数对应在 XML 中一个父标记节点中的参数, 如图 7 所示。

表 5 路由图节点的可选参数
Table 5 Optional parameters for routing graph nodes

操作动作	其他可选参数
移动物体	
物体移离	索引号、步骤式、对象物体、目标位姿、工具、提示信息
物体移近	
倾倒物体	索引号、步骤式、对象物体、目标位姿、工具、倾倒角、提示信息
显示物体	索引号、步骤式、对象物体、显示位姿、提示信息
隐藏物体	索引号、步骤式、对象物体、提示信息
出现特效	索引号、步骤式、特效对象、显示位姿、持续时长、特效尺寸
出现文字	索引号、步骤式、文字内容、显示位姿、持续时长、文字尺寸
物体动画	索引号、步骤式、对象物体、目标位姿、动画速度
播放视频	索引号、步骤式、视频对象、播放时段、持续时长
发出声音	索引号、步骤式、声音对象、目标位姿、持续时长、声音大小
散发气味	索引号、步骤式、气味种类、持续时长、气味浓度、风扇功率
释放热量	索引号、步骤式、温度、持续时长、风扇功率

```

<实验步骤>
  <索引号>.....</索引号>
  <父步骤式>.....</父步骤式>
  <子步骤式>.....</子步骤式>
  <操作动作>.....</操作动作>
  <对象物体>.....</对象物体>
  <目标位姿>.....</目标位姿>
  <倾倒角>.....</倾倒角>
  <工具>.....</工具>
  <提示信息>.....</提示信息>
  <持续时长>.....</持续时长>
  <尺寸>.....</尺寸>
  <动画速度>.....</动画速度>
  <播放时段>.....</播放时段>
  <声音大小>.....</声音大小>
  <气味种类>.....</气味种类>
  <气味浓度>.....</气味浓度>
  <温度>.....</温度>
  <风扇功率>.....</风扇功率>
</实验步骤>
.....

```

图7 路由图节点在步骤文件中的存储格式

Fig. 7 Storage format of routing graph nodes in step file

```

<场景物体>
  <物体名称>.....</物体名称>
  <FBX源文件>.....</FBX源文件>
  <父物体>.....</父物体>
  <位置>.....</位置>
  <位姿>.....</位姿>
  <缩放比例>.....</缩放比例>
</场景物体>

```

图8 物体初始状态参数在场景文件中的存储格式

Fig. 8 Storage format of initial state parameters of object in scene file

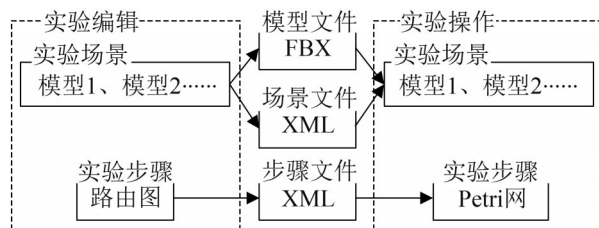


图9 创作结果的存储和读取

Fig. 9 Storage and reading of creation results

3 开发实验验证

3.1 虚拟实验创作和操作的整个过程

由图1虚拟实验的组成结构可知,虚拟实验的创作过程除了要对实验步骤序列编辑外,还需要对实验场景进行编辑。实验场景的编辑过程主要是设置和摆放虚拟物体。实验场景的编辑结果以XML文本文件的格式存储,该文本文件称为场景文件。一个物体在实验中的初始状态参数对应XML中一个父标记节点中的参数,如图8所示。虚拟物体以FBX模型文件格式进行存储和读取,场景文件中的“FBX源文件”参数表示该物体对应的FBX模型文件的存储路径。

虚拟实验创作结果可存储为场景文件及场景文件所涉及物体的FBX源文件(简称模型文件)、步骤文件3种。操作实验时将场景文件及模型文件还原为实验场景,将步骤文件还原为实验步骤序列,如图9所示。操作实验时,实验步骤序列以Petri网形式进行描述,实时判定操作步骤的完成条件和可操作条件的满足情况,确定已完成步骤和当前可操作步骤,确定实验现象。

3.2 实例验证

本文以中学的铝热反应实验为例,对虚拟实验生成方法进行验证。在虚拟实验创作时,将FBX模型文件放到虚拟场景里,调整好模型的位姿等属性。然后根据铝热反应的实验步骤和步骤序列的特点,设置好路由图各个节点的节点参数,系统会根据步骤式自动连线,形成路由图。实际实验序列与路由图的对应关系如图10~11所示。路由图每个节点的步骤式如表6所示(未列出的父步骤式和子步骤式为空白)。实际实验中,步骤 p_1 完成后实验者可选择先操作步骤 p_2 或 p_5 ,并规定操作完 p_2 后下一步只允许操作 p_3 ,而不能操作 p_5 ,所以路由图中 p_2 设置了子步骤式 f_2^c 为3,同理 p_3 、 p_5 、 p_6 也设置了子步骤式。实际实验中,没点燃火柴的时候火柴靠近镁条是不会点燃镁条的,为模拟这种实验现象,加入了原实验非必须的步骤 p_{14} 、 p_{15} 。如果实验者操作完成 p_{14} ,操作动作类型为无需操作的步骤 p_{15} 的可操作条件满足,同时完成条件也满足,会在场景中出现文字提示“火柴未点燃,不能点燃镁条”。

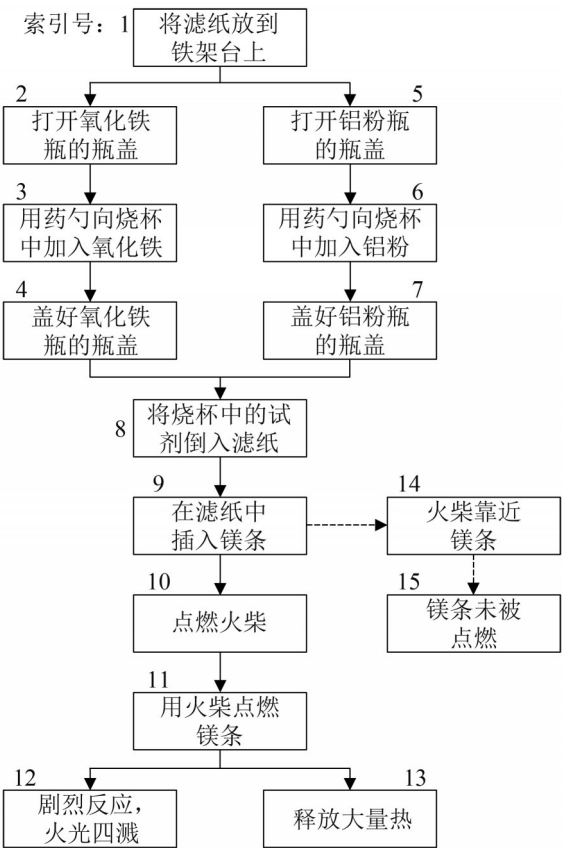


图 10 铝热反应实验步骤序列
Fig. 10 Sequence of thermite reaction experiment steps

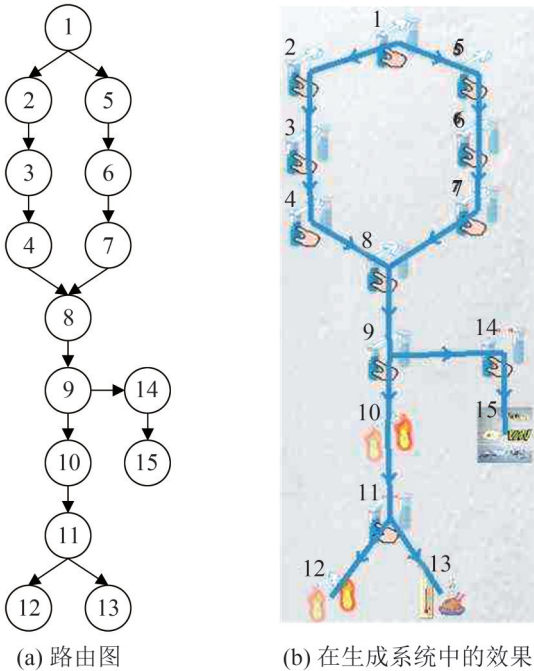


图 11 铝热反应实验步骤序列的路由图表示
Fig. 11 Routing diagram representation of sequence of thermite reaction experiment

表 6 路由图每个节点的步骤式
Table 6 Steps of each node in routing graph

步骤索引	步骤式	步骤索引	步骤式
1	—	9	f_9^p 为 8
2	f_2^p 为 1, f_2^c 为 3	10	f_{10}^p 为 9
3	f_3^p 为 2, f_3^c 为 4	11	f_{11}^p 为 10
4	f_4^p 为 3	12	f_{12}^p 为 11
5	f_5^p 为 1, f_5^c 为 6	13	f_{13}^p 为 11
6	f_6^p 为 5, f_6^c 为 7	14	f_{14}^p 为 9
7	f_7^p 为 6	15	f_{15}^p 为 14
8	f_8^p 为 4&7		

实验创作完成后, 将创作结果存储为场景文件、模型文件和步骤文件, 操作实验时再读取这些文件。实验环境布置如图 12 所示, 部分步骤的操作效果如图 13 所示。操作过程中实验者可从耳机里听到虚拟物体碰撞发出的声音、火柴和镁条燃烧的声音。实验最后, 镁条燃烧的热量促使氧化铁和铝发生剧烈反应, 并产生大量的热, 通过温感呈现装置实验者能够感受到热风。



图 12 实验者在操作虚拟实验
Fig. 12 Experimenter is operating a virtual experiment

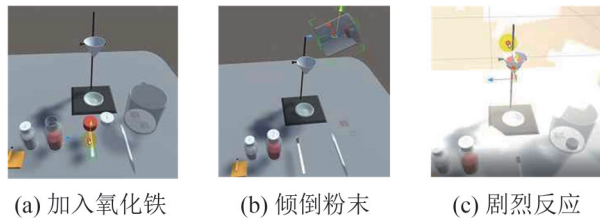


图 13 实验某些步骤的操作效果
Fig. 13 Effect of experimental part of operation

4 结论

本文以Petri网为理论基础,对实验操作及实验步骤序列进行描述,并用路由图的编辑形式实现虚拟实验的可视化快速生成;提供了硬件接口,支持虚拟实验中嗅觉和温感通道的呈现。通过实例验证了本文提出的生成方法可有效地创作真实感较强的虚拟实验,提高虚拟实验的开发效率,有助于实验教学的发展。

参考文献:

- [1] 朱敏,朱焱. 虚拟实验与物理课程教学[M]. 南京: 东南大学出版社, 2008.
Zhu Min, Zhu Yan. Virtual Experiment and Physics Course Teaching[M]. Nanjing: Southeast University Press, 2008.
- [2] Sun C, Pan Z, Li Y. SRP Based Natural Interaction between Real and Virtual Worlds in Augmented Reality [C]//International Conference on Cyberworlds. Hangzhou: IEEE Computer Society, 2008: 117-124.
- [3] Tsuda N, Morikawa A, Nomura Y, et al. Pressure Presentation Strength for Calligraphy Brushwork Instruction[C]//IEEE International Symposium on Robotics&Intelligent Sensors. Ottawa: IEEE, 2017: 198-202.
- [4] Luo Tianren, Zhang Mingmin, Li Zheng, et al. Dream-Experiment: A MR User Interface with Natural Multi-Channel Interaction for Virtual Experiments[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics (S1077-2626), 2020, 26(12): 3524-3534.
- [5] Nicholas H, Pooi-Mun W, Matthew C, et al. Virtual Reality Training for Assembly of Hybrid Medical Devices [J]. Multimedia Tools & Applications(S1380-7501), 2018 (77): 1-32.
- [6] 卿烈华. 基于Petri网的民航机电维护优化研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2016.
Qing Liehua. Research on Civil Aviation Maintenance Process Based on Petri Net[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2016.
- [7] 董健康, 杨柳, 耿宏. 基于循环迭代的飞机虚拟拆装过程建模方法[J]. 计算机工程与设计, 2020, 41(2): 494-499.
Dong Jiankang, Yang Liu, Geng Hong. Aircraft Virtual Disassembly Process Modeling Method Based on Cyclic Iteration[J]. Computer Engineering and Design, 2020, 41 (2): 494-499.
- [8] Hend S Al-Khalifa. CHEMOTION: A Gesture Based Chemistry Virtual Laboratory with Leap Motion[J]. John Wiley&Sons, Ltd(S1180-4009), 2017, 25(6): 1-16.
- [9] Coelho H, Melo M, José Martins, et al. Collaborative Immersive Authoring Tool for Real-Time Creation of Multisensory VR Experiences[J]. Multimedia Tools and Applications(S1380-7501), 2019, 78(14): 19473-19493.
- [10] Mujika A, Oyarzun D, Iparragirre I, et al. MACHS: An Authoring Tool to Create Serious Games for Machine-Tool Operator Training[C]//International Conference on Emerging Elearning Technologies& Applications. Stara Lesna: IEEE, 2011: 147-152.
- [11] 黎永斌, 吴悦明, 何汉武, 等. 一种气味发生器: 201922340576.3[P]. 2020-08-28.
Li Yongbin, Wu Yueming, He Hanwu, et al. An Odor Generator: 201922340576.3[P]. 2020-08-28.
- [12] 吴悦明, 许明西, 何汉武, 等. 一种虚拟实验平台的热触觉再现装置: 201910667640.0[P]. 2019-07-23.
Wu Yueming, Xu Mingxi, He Hanwu, et al. Thermal Tactile Reproduction Device of Virtual Experiment Platform: 201910667640.0[P]. 2019-07-23.