

9-18-2020

## Interactive Assembly Simulation Platform for Complex Gearbox in Virtual Environmen

Chunyang Jia

*College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China;*

Xiangjun Zou

*College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China;*

Jinhui Li

*College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China;*

Zeqin Zeng

*College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China;*

*See next page for additional authors*

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.

---

## Interactive Assembly Simulation Platform for Complex Gearbox in Virtual Environmen

### Abstract

**Abstract:** Aiming at the human-computer interaction, behavior simulation and user design in virtual assembly, based on the complex gearbox of large tractors, the simulation method of dynamic motion and behavior of gear with multi-collision body is studied. *The positioning method of multi-part model based on axis constraints and surface constraints in virtual environment is proposed. The virtual environment of human-computer interaction is developed.* The consumed time of per frame is about 10 ms, and the complex variable-speed motion behavior and its simulation are realized. The virtual assembly system is equipped with AR interface, which can realize the active intelligent virtual assembly by hand. The experiments show that the system can provide active virtual assembly, interference detection, assembly knowledge learning, program design, and assembly error messages of the user requirements. It provides a simulation scalable platform for virtual manufacturing and assembly of complex gearboxes.

### Keywords

virtual reality, gearbox, motion simulation, virtual assembly, collision detection

### Authors

Chunyang Jia, Xiangjun Zou, Jinhui Li, Zeqin Zeng, and Wang Jie

### Recommended Citation

Jia Chunyang, Zou Xiangjun, Li Jinhui, Zeng Zeqin, Wang Jie. Interactive Assembly Simulation Platform for Complex Gearbox in Virtual Environmen[J]. Journal of System Simulation, 2020, 32(9): 1736-1743.

# 虚拟环境下的复杂变速箱交互式装配仿真平台

贾春洋, 邹湘军\*, 李锦慧, 曾泽钦, 王杰

(华南农业大学 工程学院, 南方农业机械与装备关键技术教育部重点实验室, 广东 广州 510642)

**摘要:** 为解决虚拟装配存在人机交互度、行为仿真与用户设计效果不佳等问题。以大型拖拉机变速箱为对象, 研究了多碰撞体的齿轮动力学运动与行为仿真方法, 提出了基于轴和面约束的多零件模型在虚拟环境中的定位方法, 开发了人机交互式的虚拟环境, 每帧消耗的时间约为 10 ms, 实现了复杂变速运动行为及其仿真。同时虚拟装配模块里配置了 AR 接口, 可通过手式进行主动式智能虚拟装配。试验表明, 系统能按照用户需求进行主动式的虚拟装配、干涉检测、学习装配知识、方案设计、提示装配错误等, 为复杂变速箱的虚拟制造与装配提供了仿真平台, 平台具有可扩展性。

**关键词:** 虚拟现实; 变速箱; 运动仿真; 虚拟装配; 碰撞检测

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2020) 09-1736-08

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.19-0060

## Interactive Assembly Simulation Platform for Complex Gearbox in Virtual Environmen

Jia Chunyang, Zou Xiangjun\*, Li Jinhui, Zeng Zeqin, Wang Jie

(College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

**Abstract:** Aiming at the human-computer interaction, behavior simulation and user design in virtual assembly, based on the complex gearbox of large tractors, the simulation method of dynamic motion and behavior of gear with multi-collision body is studied. *The positioning method of multi-part model based on axis constraints and surface constraints in virtual environment is proposed. The virtual environment of human-computer interaction is developed.* The consumed time of per frame is about 10 ms, and the complex variable-speed motion behavior and its simulation are realized. The virtual assembly system is equipped with AR interface, which can realize the active intelligent virtual assembly by hand. The experiments show that the system can provide active virtual assembly, interference detection, assembly knowledge learning, program design, and assembly error messages of the user requirements. It provides a simulation scalable platform for virtual manufacturing and assembly of complex gearboxes.

**Keywords:** virtual reality; gearbox; motion simulation; virtual assembly; collision detection

## 引言

智能仿真、虚拟设计与制造是产品创新的新动力<sup>[1]</sup>。作为重要农机装备的拖拉机, 其变速箱结构

复杂, 装配要求严, 直接影响整机负载、动力和平稳性。如何提高变速箱的装配设计水平是一个不可逾越的问题<sup>[2]</sup>。

变速箱的装配与设计成本高, 培训周期长等问题, 使用虚拟培训技术能够弥补这些不足。虚拟现实技术是现代仿真技术的一个重要发展方向<sup>[3-4]</sup>。邹湘军提出智能 VR 是一个特征<sup>[3]</sup>, 早在 2004 年文献中也提出了 VR 技术特征将由 3I 发展到 4I<sup>[3]</sup>,



收稿日期: 2019-02-02 修回日期: 2019-03-03;  
基金项目: 国家重点研发计划(2017YFD0700100);  
作者简介: 贾春洋(1995-), 男, 河南漯河, 硕士, 研究方向为虚拟现实; 邹湘军(1957-), 女, 湖南衡阳, 教授, 博导, 研究方向为虚拟现实、智能设计与制造、机器视觉。

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

• 1736 •

并用该技术成功创新开发了水果采摘机器人<sup>[5-7]</sup>。近年来也有不少国内研究者对虚拟现实软件在产品方面进行了大量的研究<sup>[8-11]</sup>。欧美等发达国家已经在虚拟装配预分析研究、虚拟装配追踪等方向已经达到了比较深入的研究阶段<sup>[11-12]</sup>, EL-Sayed S 等<sup>[12]</sup>基于 GMod 游戏引擎研究讨论了装配过程中涉及的操作, 包括装配特征, 特征关联, 运动学约束和子装配等级等。师翊等<sup>[13]</sup>利用虚拟物理引擎对撒肥机机械传动过程进行仿真。吕萌萌等<sup>[14]</sup>通过三维仿真对果树的枝、叶、花等修剪进行模拟。杨壹斌等<sup>[15]</sup>以典型通信装备为研究对象验证了 Unity3D 开发的维修系统具备良好的操作便利性和扩展移植性。姚鹏飞等<sup>[16]</sup>设计了绞吸式挖泥船仿真系统, 用于解决绞吸式挖泥船传统培训问题。但以上系统碰撞体精度不高, 不能满足复杂齿轮的动力学运动仿真模拟。同时, 其中某些系统采用动画的形式进行装配, 人机交互度不高。

本文以某集团大型拖拉机 1200 系列变速箱为例, 使用 Unity3D 搭建了一个交互式的装配仿真平台, 提出基于约束的多零件模型在虚拟环境中的装配定位方法, 可对零件进行装配与拆卸。同时, 提出多碰撞体的齿轮动力学运动行为仿真方法, 能够快速地对整体装配准确度做出评价。相对于传统的虚拟装配系统, 该平台可对产品的进行实时装配与行为仿真, 用智能技术大幅度降低装配周期, 从而提高用户整体的设计与装配水平。对复杂变速箱的装配、设计及知识学习有着重要意义。

## 1 虚拟变速箱装配仿真平台搭建

### 1.1 平台架构

本文的主要架构如图 1 所示, 每一个模块之间都是通过数据库进行连接。

(1) 系统登录模块。该系统所面对的客户主要分 2 种角色: 学习人员, 设计人员。2 种角色都可登陆, 用户通过输入账号密码, 选择角色, 成功登录后进入角色所对应的页面, 不同角色所能使用的

模块及功能不同。设计人员可用所有功能模块, 学习人员可使用除零件修改以外的功能模块。

(2) 零件属性模块。对单个零件的展示, 同时会显示该零件的所有属性, 包括轮齿数、圆环数、每个轮齿的模数、每个轮齿的齿数、圆环的外径内径等。

(3) 零件修改模块。修改单个零件属性, 可以增加或减少轮齿、圆环、面约束、轴约束等。

(4) 零件装配模块。通过模型树寻找到对应的零件, 系统会自动将该零件移动到场景中心处, 可用鼠标方式将该零件移动到目标轴附近, 再根据友好提示进行配合操作。

(5) 装配评价模块。对装配好的零件进行动力学和运动评价, 如不能正常运动, 则会提示错误信息, 指导用户重装配。

(6) 场景设置模块。为了给用户提供更舒适的操作体验, 本文构建场景设置模块, 可根据用户的喜好对装配背景颜色、相机漫游方式、光源、零件贴图等进行设置。

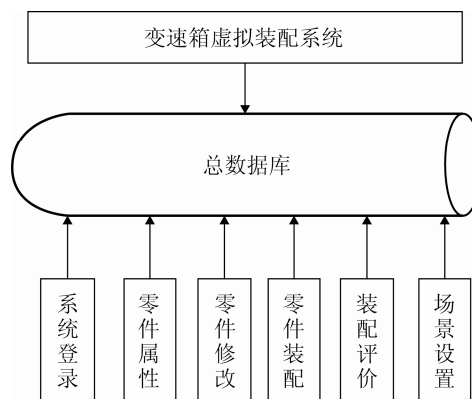


图 1 仿真系统方案

Fig. 1 Solution for simulation system

### 1.2 UI 交互界面

本系统的界面是基于 Unity3D 的 NGUI 插件实现的, 主要负责整个系统运行的管理。通过该模块, 用户可以向主控系统或子功能模块下达命令, 同时它还可以将系统运行过程中的状态信息或错误信息在 UI 交互界面中实时的反馈给用户, 等待接收用户新的命令。登录系统后直接进入系统初始面,

如图 2 所示, 本系统主要有 4 大菜单, 分别是: 零件属性、零件修改、零件装配、运动仿真。点击对应的按钮可以进入对应的功能选项。



图 2 系统初始界面

Fig. 2 System initial interface

### 1.3 三维模型的构建

以某集团大型拖拉机 1200 系列复杂变速箱为例, 它包括了慢 8 档、快 8 档与倒 8 档, 共计变速 24 档位。本文先采用 SolidWorks 建模软件构建该变速箱三维模型, 然后用自主开发的 CAD 格式转换软件将模型转换为 Unity3D 平台可读取的 obj 格式。最终拖拉机变速箱仿真模型图如图 3 所示。

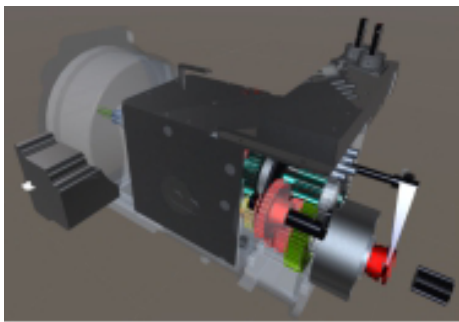


图 3 大型拖拉机变速箱三维模型

Fig. 3 Three-dimensional model of large tractor gearbox

## 2 虚拟装配及仿真系统关键技术

### 2.1 碰撞体的构建

为了模拟复杂的齿轮碰撞过程, 以图 4(a) 示齿轮为例, 在 Unity3D 中直接为齿轮添加 MeshCollider, 结果如图 4(b) 中的绿色线框, 不能模拟出实际中齿轮的物理碰撞效果, 需要绘制出更精确的网格作为齿轮的碰撞器。根据多碰撞体

理论, 将一个零件分解为多个轮齿和多个圆环, 再将每个轮齿分成一个个的单齿, 每个圆环分割成多个梯形棱柱, 应用 Mesh Filter 组件来进行绘制小组件<sup>[17-18]</sup>。

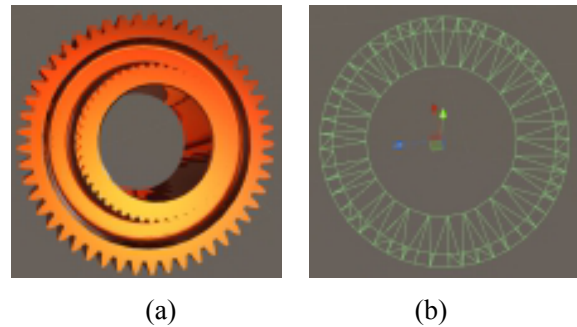


图 4 碰撞体

Fig. 4 Collider

#### 2.1.1 外齿轮顶点坐标的求解

如图 5 所示, 点 A, B, C 分别表示渐开线与基圆, 分度圆, 齿顶圆的交点, 点 A<sub>1</sub>, B<sub>1</sub>, C<sub>1</sub> 表示相对渐开线与基圆、分度圆、齿顶圆的交点用 D 表示分度圆直径, D<sub>b</sub> 表示基圆直径, D<sub>a</sub> 表示齿顶圆直径。

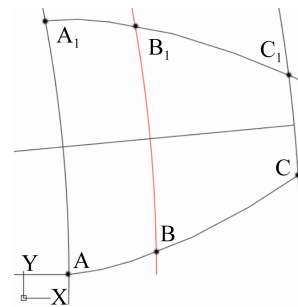


图 5 齿轮顶点坐标

Fig. 5 The vertex coordinates for gear

已知齿轮渐开线的参数方程为:

$$\begin{cases} x = \frac{D_b}{2} \cdot (t \sin t + \cos t) \\ y = \frac{D_b}{2} \cdot (\sin t - t \cos t) \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $t$  为渐开线发生线在基圆上的滚动角度;  $(x, y)$  为渐开线上的所有点坐标。

根据式(1)可求出图 5 中 B、C 点坐标。

再通过插值法得到介于弧线 AB, BC 之间其它点的坐标。

为求其对应点  $A_1, B_1, C_1$  的坐标值, 将整体绕齿轮的中心点旋转至图 6 所示的位置。

其旋转角度:

$$\alpha = \arctan\left(\frac{y_B}{x_B}\right) + \frac{D_g}{D} \quad (2)$$

式中:  $\alpha$  为旋转角度;  $x_B$  为 B 点的横坐标;  $y_B$  为 B 点的纵坐标;  $D_g$  为齿厚。

动点绕定点的旋转方程为:

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中:  $(x_0, y_0)$  为旋转前的坐标;  $\theta$  为旋转角度;  $(x_1, y_1)$  为旋转后的坐标。

通过对称性, 即可得到图 6 中的  $A_1, B_1, C_1$  及其中间插值点的坐标值。同理, 可得其他齿上三角面片的顶点坐标。

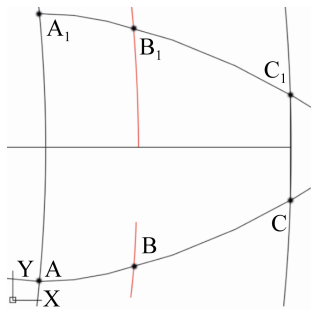


图 6 旋转后的齿轮顶点坐标

Fig. 6 Vertex coordinates for gear after rotation

### 2.1.2 内齿轮顶点坐标的求解

当齿轮的参数确定时, 可得到图 6 中的所有顶点坐标, 关于分度圆对称便是内齿轮的所有顶点坐标。

### 2.1.3 圆环顶点坐标的求解

根据需要将圆环分成若干份, 本文选择的分割数是 50, 圆环的顶点坐标为:

$$\begin{cases} x = R \cos \theta \\ y = R \sin \theta \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $\theta$  为变量, 根据分割数计算;  $R$  为圆环的内径或圆环的外径。

当绘制完成后, 遍历小组件, 将其 MeshCollider 复制到原模型上, 最终所得到的碰撞盒形状如图 7 所示。引用多 MeshCollider 的方法能设计制作精确的齿轮碰撞器。

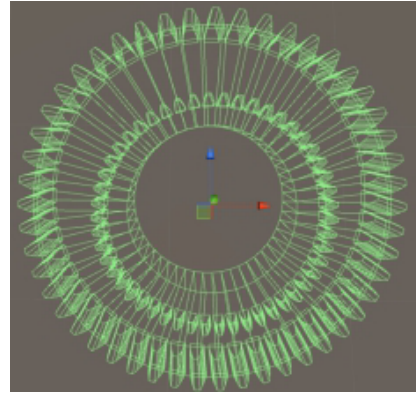


图 7 绘制的碰撞体

Fig. 7 Drawing of gear collider

## 2.2 基于智能的交互式动态装配

根据装配配合工艺流程, 以齿轮与轴的配合为例, 先将齿轮装配的轴上(轴配合), 再在将齿轮沿轴线方向滑动直到齿轮上的某个面与齿轮轴上的某个面对齐(简称面配合)。

### 2.2.1 装配件的同轴配合

在装配过程中目标轴是固定的, 经平移和旋转将齿轮移动到目标轴的装配端, 并保证两者同轴。

#### (1) 齿轮的平移

为了增加仿真的真实性, 齿轮需按照一定的速度移动到目标轴的装配端。因为在装配前为每个零件都设置了装配盒, 故齿轮不会直接穿过目标轴到达装配端, 所以在平移过程中只需实时获取零件的中心点与装配位置的世界坐标, 零件在每帧的移动向量表达式为:

$$\mathbf{v} = \frac{\mathbf{k}}{|\mathbf{k}|} \cdot C_s \cdot t^{-1} \quad (5)$$

式中:  $\mathbf{v}$  为齿轮在每帧的偏移量;  $\mathbf{k}$  为零件的中心点与装配位置连成的向量;  $C_s$  为常量, 表示齿轮的

速度;  $t$  为表示每帧所消耗的时间。

(2) 齿轮的旋转

齿轮的旋转轴向量表达式为:

$$a = p_2 \times p_1 \quad (6)$$

式中: 向量  $a$  为零件旋转的旋转轴;  $p_1$  为目标轴轴线的方向上的单位向量;  $p_2$  为齿轮的轴线方向上的单位向量。

齿轮每帧的旋转角度为:

$$r = \frac{\theta}{|\theta|} \cdot C_\theta \cdot t^{-1} \quad (7)$$

式中:  $\theta$  为式(6)中向量  $p_1$  与向量  $p_2$  的夹角;  $C_\theta$  为常量, 表示齿轮的旋转角速度;  $t$  为每帧所消耗的时间。

2.2.2 端面配合

当齿轮与目标轴完成轴配合后, 齿轮需要通过面配合到达轴的某一个安装位置。如图 8 所示, 点击齿轮上的某一个面, 然后点击目标轴上的某一个面, 系统实时获取 2 个面片的世界坐标, 并将齿轮直接平移到目标位置。

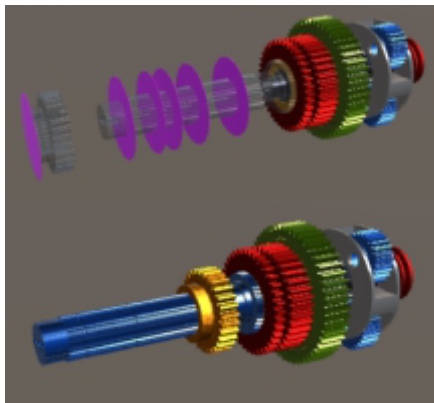


图 8 零件的面装配  
Fig. 8 Surface assembly of parts

2.2.3 交互式手势的智能装配技术

为了更接近真实环境的手工装配, 该仿真平台给用户设计了虚拟装配的 AR 接口, 通过该接口, 用户可以通过手势与场景进行主动式智能虚拟装配, 如图 9 所示, 该接口具有通用性。



图 9 交互式手势的智能装配  
Fig. 9 Interactive hand-based intelligent assembly

2.3 装配效果评价

该模块可对整体装配准确度快速的做出评价, 如齿轮错装、漏装等装配问题, 并在用户交互界面中反馈给用户。该评价主要分成两个过程。

(1) 动力学运动仿真

如图 10 所示, 通过给输入轴转矩, 观察齿轮的运动状况。同时, 可通过透明化其他物体, 突出目标零件, 方便观察该零件属性以及转速等相关信息。

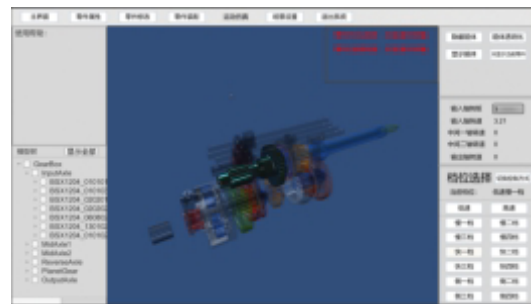


图 10 动力学运动评价界面  
Fig. 10 Interface of dynamic motion simulation

(2) 数据库对比

本文建立了零件和虚拟场景的数据库。若无法正常运动, 从零件图和虚拟场景的数据库中遍历每个零件与其中间节点的相对位置坐标和旋转坐标, 与用户实际装配的数据进行对比, 如果不能同时满足式(8)~(9)则在帮助栏中发送信息, 如(零件名)零件错装, 请重新装配。

$$|p_{scene} - p_{data}| \leq p_{error} \quad (8)$$

$$|r_{scene} - r_{data}| \leq r_{error} \quad (9)$$

式中:  $p_{scene}$  为零件在场景中的相对其对应中间节点的相对位置坐标;  $p_{data}$  为零件在数据库中的相对其对应中间节点的相对位置坐标;  $p_{error}$  为允许的装

配位置误差;  $r_{scene}$  为零件在场景中的相对其对应中间节点的相对旋转坐标;  $r_{data}$  为零件在数据库中的相对其对应中间节点的相对旋转坐标;  $r_{error}$  为允许的装配旋转误差。

## 2.4 场景漫游

在 Unity3D 中, 通过控制 camera 对象调整视角, 本平台的主要控制方式有 2 种:

(1) 模拟常用的建模软件, 鼠标滚轮控制离目标的距离, 按下鼠标中键, 滑动鼠标控制视角的旋转。

(2) 模拟大型游戏对游戏角色的控制, 通过键盘 WASD 键控制前后左右的移动, 鼠标控制观察方向。相对于漫游方式(1), 该方法能够更快速的移动到在视角边缘的物体上。

## 2.5 零件拖拽

为了实现零件的拖拽, 给物体添加碰撞体, 根据鼠标平面坐标, 计算出 camera 对象与鼠标点击对应位置之间空间关系, 并构建以 camera 对象为发射原点的射线。当检测到该射线碰撞到物体后, 将碰撞点的世界坐标转换成屏幕坐标, 然后将鼠标在屏幕上的移动量赋值给物体。

## 2.6 背包功能

为了解决零件放置杂乱问题, 将零件分类放置。打开背包系统后会在屏幕中出现背包界面, 如图 11 所示, 界面的右上角为下拉菜单, 用于对零件的分类。当零件被拖到背包界面范围中时, 系统将自动识别零件类型, 并将零件以图片的形式放置在对应该类型的背包中。

具体实现过程如下:

(1) 实时获取背包 4 个角的屏幕坐标。

(2) 当鼠标拖动零件时, 鼠标的屏幕横坐标在背包界面范围内, 零件不显示, 显示零件对应的图片。

(3) 此时拖拽零件变成拖拽图片, 图片如果靠近可以放置的格子时, 图片会自动移动到该位置。

(4) 当零件拖出背包区域时, 零件对应的图片不显示, 同时显示零件。



图 11 背包功能

Fig. 11 Backpack module

## 3 试验与分析

为了试验本系统的实用性, 选择 20 台不同的计算机进行测试, 分别对应 20 个机械专业人员进行单个不同零件的装配测试, 测试结果见表 1。同时选取甲、乙两名没有任何机械基础的人员, 对单个零件连续做 10 次装配试验, 随着次数的增加, 其单次装配耗时如图 12 所示。

表 1 平台试验情况统计  
Tab. 1 Statistical of platform test

序号	装配耗时/s	平均每帧耗时/ms	成功装配
1	19.83	10.19	成功
2	25.90	10.40	成功
3	19.02	9.67	成功
4	29.21	9.64	成功
5	27.09	9.62	成功
6	16.56	10.32	成功
7	27.69	10.27	成功
8	19.63	10.30	成功
9	22.65	10.74	成功
10	21.06	9.94	成功
11	28.72	9.86	成功
12	21.73	9.88	成功
13	26.64	10.92	成功
14	21.96	10.47	成功
15	15.48	10.21	成功
16	28.99	10.61	成功
17	17.50	10.22	成功
18	23.84	9.52	成功
19	29.79	9.67	错误
20	15.46	10.18	成功



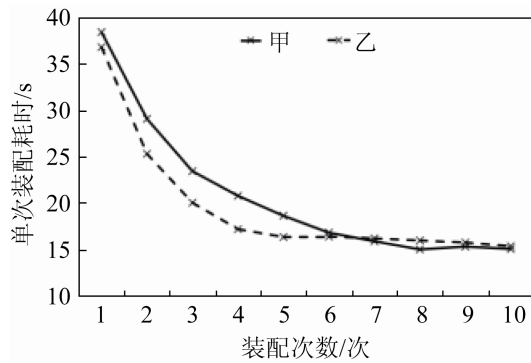


图12 装配耗时与装配次数关系

Fig. 12 Relation between assembly time and assembly numbers

## 4 结论

(1) 本文提出基于约束的多零件模型在虚拟环境中的装配定位方法,能够提高用户变速箱装配熟练度,同时提高用户的装配效率。20次试验中全部按照用户的命令进行装配,其中有一次因为用户对变速箱装配知识不了解造成装配错误,并及时进行警告提醒。

(2) 本文还提出了多 MeshCollider 的齿轮动力学运动仿真方法,结合 Unity 3D 自带的物理引擎,模拟真实世界中齿轮的碰撞方式,来评价装配的可行性。每帧消耗的时间为 10 ms 左右,能保证仿真系统运行的流畅度和实时的交互效果。

(3) 为提供更舒适的操作体验,本文还构建了多个辅助功能,能够更好地实现交互式虚拟仿真效果。

(4) 构建的虚拟装配平台可以有效指导用户对复杂变速箱进行装配,下一步将应用该平台进一步开展农业装备其它重要部件的虚拟装配,并根据用户反馈进行系统的优化升级。

## 参考文献:

[1] 李伯虎,柴旭东,张霖,等. 面向新型人工智能系统的建模与仿真技术初步研究[J]. 系统仿真学报, 2018, 30(2): 349-362.  
Li Bohu, Chai Xudong, Zhang Lin, et al. Preliminary Study of Modeling and Simulation Technology Oriented to Neo-type Artificial Intelligent Systems[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(2): 349-362.

- [2] 王娟,吕新民,廖宇兰,等. 虚拟样机技术及其在拖拉机变速器中的应用[J]. 农机化研究, 2010, 32(3): 189-192.  
Wang Juan, Lü Xinmin, Liao Yulan, et al. Application of Virtual Prototyping Technology in Tractor Reducer [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2010, 32(3): 189-192.
- [3] 邹湘军,孙健,何汉武,等. 虚拟现实技术的演变发展与展望[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(9): 1905-1909.  
Zou Xiangjun, Sun Jian, He Hanwu, et al. The Development and Prospects of Virtual Reality[J]. Journal of System Simulation, 2004, 16(9): 1905-1909.
- [4] 罗陆锋,邹湘军,刘天湖,等. 大数据量虚拟景观的三维模型优化与漫游[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(6): 1654-1657.  
Luo Lufeng, Zou Xiangjun, Liu Tianhu, et al. 3D Model Optimization and Navigation of Large-Scale Virtual Landscape[J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(6): 1654-1657.
- [5] Zou X, Zou H, Lu J. Virtual manipulator-based binocular stereo vision positioning system and errors modelling[J]. Machine Vision and Applications (S0932-8092), 2012, 23(1): 43-63.
- [6] Zou X J, Ye M, Luo C Y, et al. Fault-tolerant design of a limited universal fruit-picking end-effector based on visoin positioning error[J]. Applied Engineering in Agriculture (S0883-8542), 2016, 32(1): 5-18.
- [7] Luo L F, Tang Y, Zou X, et al. Vision-based extraction of spatial information in grape clusters for harvesting robots[J]. Biosystems Engineering (S1615-7591), 2016, 151: 90-104.
- [8] 祝朝政,何明,杨晟,等. 基于多传感器的警犬姿态实时重建与仿真[J]. 系统仿真学报, 2018, 30(12): 4738-4746.  
Zhu Chaozheng, He Ming, Yang Sheng, et al. Real-time Reconstruction and Simulation of Police Dog Posture Based on Multi-sensor Data Vest[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(12): 4738-4746.
- [9] 廖瑛,季海雨,薛高雄. 基于伪谱法的巡航导弹最优闭环制导方法[J]. 系统仿真学报, 2018, 30(9): 3464-3471.  
Liao Ying, Ji Haiyu, Xue Gaoxiong. Optimal Closed-Loop Guidance for Cruise Missiles Based on Pseudospectral Method[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(9): 3464-3471.
- [10] 郭晨,焉丽飞,沈海青. 超大型双桨双舵船舶运动数学模型与虚拟仿真[J]. 系统仿真学报, 2015, 27(9):

- 1976-1982, 1988.
- Guo Chen, Yan Lifei, Shen Haiqing. Mathematical Model of Maneuvering Motion and Virtual Simulation for Ultra Large Twin-propeller Twin-rudder Ship[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(9): 1976-1982, 1988.
- [11] Cecil J, Jones J. VREM: An advanced virtual environment for micro assembly[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology (S0268-3768), 2014, 72(1/4): 47-56.
- [12] Aziz E S S, Chang Y, Esche S K, et al. Virtual mechanical assembly training based on a 3D game engine[J]. Computer-Aided Design and Applications (S0010-4485), 2015, 12(2): 119-134.
- [13] 师翊, 刘桂阳, 刘金明. 基于 Unity 3D 的撒肥机虚拟仿真[J]. 农机化研究, 2014(7): 62-66.
- Shi Yi, Liu Guiyang, Liu Jinming. Virtual Simulation for Fertilizer Applicator Based on Unity 3D[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2014(7): 62-66.
- [14] 吕萌萌, 郭新宇, 陆声链, 等. 基于 Unity 3D 果树交互虚拟修剪技术及其实现[J]. 农机化研究, 2015(4): 7-11.
- Lv Mengmeng, Guo Xinyu, Lu Shenglian, et al. Virtual Interactive Pruning Operation on Fruit Tree Based on Unity 3D[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015(4): 7-11.
- [15] 杨壹斌, 李敏, 解鸿文. 基于 Unity3D 的桌面式虚拟维修训练系统[J]. 计算机应用, 2016(增 2): 125-128.
- Yang Yibin, Li Min, Xie Hongwen. Desktop virtual maintenance training system based on Unity3D[J]. Journal of Computer Applications, 2016(S2): 125-128.
- [16] 姚鹏飞, 陈正鸣, 童晶, 等. 基于 Unity3D 的绞吸式挖泥船虚拟仿真系统[J]. 系统仿真学报, 2016, 28(9): 2069-2075.
- Yao Pengfei, Chen Zhengming, Tong Jing, et al. Virtual Simulation System of Cutter Suction Dredger Based on Unity3D[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(9): 2069-2075.
- [17] Wei W, Cheng Z, Yun Y, et al. Virtual Maintenance-Oriented Collision Detection Algorithm[J]. Computer Applications and Software (S1000-386X), 2016.
- [18] Fei L, Yunpeng G, Yukun L. The Research of System Architecture of Dynamics Modeling System Based on Virtual Assembly for Integrated Transmission[J]. Procedia Engineering (S1877-7058), 2017, 174: 456-464.
- [19] 谢斌, 李静静, 鲁倩倩, 等. 联合收割机制动系统虚拟样机仿真及试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(4): 18-24.
- Xie Bin, Li Jingjing, Lu Qianqian, et al. Simulation and experiment of virtual prototype braking system of combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(4): 18-24.
- [20] Katz N, Cook T, Smart R. Extending Web Browsers with a Unity 3D-Based Virtual Worlds Viewer[J]. IEEE Internet Computing (S1089-7801), 2011, 15(5): 15-21.