

# 基于 Unity3D 的绞吸式挖泥船虚拟仿真系统

姚鹏飞<sup>1</sup>, 陈正鸣<sup>1,2</sup>, 童晶<sup>1,2</sup>, 钱丽娜<sup>3</sup>

(1. 河海大学物联网工程学院, 江苏 常州 213022; 2. 常州市图形图像与骨科植入物数字化技术重点实验室, 江苏 常州 213022;  
3. 河海大学疏浚教育部工程研究中心, 江苏 常州 213022)

**摘要:**为了解决绞吸式挖泥船传统培训方法的一些不足,针对绞吸式挖泥船的施工操作流程和施工环境展示,设计了基于 Unity3D 的绞吸式挖泥船虚拟仿真系统。针对绞刀切削地形变化的仿真,采取了自动网格变形、贴图变化的方法;配合石块碎裂和管道内泥砂比重的粒子数量模拟,再通过寻路算法实现了 2D 平面的泥砂路径模拟;通过虚拟交互设备实现立体显示和人机交互,实现更好地虚拟仿真效果。

**关键词:**绞吸式挖泥船; Unity3D; 绞刀切削; 路径模拟; 虚拟现实设备

中图分类号: TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2016) 09-2069-07  
DOI:10.16182/j.cnki.joss.2016.09.022

## Virtual Simulation System of Cutter Suction Dredger Based on Unity3D

Yao Pengfei<sup>1</sup>, Chen Zhengming<sup>1,2</sup>, Tong Jing<sup>1,2</sup>, Qian Lina<sup>3</sup>

(1. College of IOT Engineering, Hohai University, Changzhou 213022, China;  
2. Key Laboratory of Graphics, Images and Orthopedic Implants, Changzhou 213022, China;  
3. Engineering Research Center of the Education Ministry of Dredging Technology, Hohai University, Changzhou 213022, China)

**Abstract:** In order to solve some shortages for the traditional training of cutter suction dredger, a virtual simulation system was designed using Unity3D, which mainly targeted at operational procedures of construction and display of construction environment. *Mesh deformation and texture changing were used to realize the simulation of the soil-cutting. The 2D path simulation which included the simulation of stone crushing and proportion of sand in the pipeline was realized by means of path-finding algorithm. 3D display and human-computer interaction were realized by virtual reality devices, which could improve the effect of the virtual simulation.*

**Keywords:** cutter suction dredger; Unity3D; soil-cutting; path simulation; virtual reality devices

## 引言

近年来,湖泊、水库、港口、航道及近海的清淤工程成为现阶段水利工程建设需要解决的焦点问题。清淤工程的工程量大、涉及地域广、地址情况复杂,通过绞吸式挖泥船可以较好地实现清淤疏

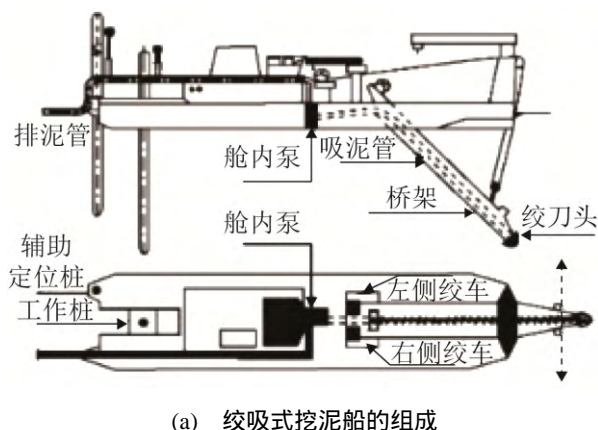
水的效果。绞吸式挖泥船是近年来世界上拥有数量最多、使用最广的一种挖泥船,完成了世界上大约 70% 的疏浚工程<sup>[1]</sup>。绞吸式挖泥船主要由船体、定位装置、绞刀、柴油机泥泵动力装置、液压系统、吸排泥管等组成(如图 1(a)所示)。其疏浚作业时,通过泥泵转动使得吸泥管产生真空压力,将被绞刀搅碎的泥浆从水底吸入,再借助离心力将泥浆通过排泥管送至排泥区,完成了疏浚吹填施工全过程<sup>[2]</sup>(如图 1(b)所示)。

绞吸式挖泥船的操作流程繁琐、工作原理复杂、工作环境多样,因此挖泥船船员上船前的操作培训



收稿日期: 2016-05-31 修回日期: 2016-07-14;  
基金项目: 常州市科技支撑项目(CE20155059), 江苏省科技支撑计划(BE2014048);  
作者简介: 姚鹏飞(1992-), 男, 江苏靖江, 硕士生, 研究方向为计算机图形学。

对于安全生产尤为重要。传统的培训方式分为两种，一种方式是基于文字图片、视频的教学培训，但是挖泥船二维图纸复杂抽象且不直观，需要一定基础的专业人员才能理解，对于一般挖泥船船员上船前教学培训的效果不好；另外一种方式是实地教学，其存在一定的安全隐患，且教学成本过高，同时水下绞刀挖泥场景和泥砂内部流向都无法直观地展示，学员很难清晰地了解挖泥船的内部作业原理。



(b) 清淤实地效果图

图 1 绞吸式挖泥船的组成和疏浚作业过程

针对传统培训方式的不足，基于虚拟现实技术的培训方式越来越受到科研人员的关注。虚拟现实是一种可以创建和体验虚拟世界的计算机系统，其开发成本低、操作方便、环境模拟逼真。利用虚拟现实技术，孙俊等人运用 Multigen Creator 和 Vega 等软件实现具有 VR 特征的船舶机舱虚拟现实仿真系统，实现了船舶机舱的场景搭建以及场景漫游<sup>[3]</sup>，其虚拟现实仿真平台研究主体在于整个场景的搭建以及虚拟漫游仿真，场景虚拟现实的交互性

和系统功能的综合性相对较低。闫文珠等人提出了基于 VR 技术的机器人核事故训练平台研究，利用新兴的计算机虚拟现实技术开发了一套面向实际工程应用的交互式核应急事故实训平台<sup>[4]</sup>，侧重于机械技术的相应开发，虚拟现实技术的应用不是很多。倪福生在绞吸挖泥船疏浚仿真研究一文中提出了多通道环形柱幕绞吸挖泥船施工模拟系统<sup>[5]</sup>，通过虚拟现实模拟视景较好地实现了虚拟培训的模拟效果，其文献中的挖泥船仿真还存在着一些问题。首先是绞刀切削仿真方面的欠缺，包括水底地形的反馈变化、泥砂石块的碎裂模拟以及管道中泥砂流向的路径模拟；其次是不能支持多平台发布，上文中虚拟仿真系统的应用平台都是 PC 端，不支持移动、网页平台的开发，限制了虚拟现实系统的使用。

针对已有挖泥船虚拟仿真系统存在的一些问题，本文考虑基于 Unity3D 平台，应用虚拟仿真算法的二次开发、挖泥船建模技术以及软件的跨平台特性，结合最新的虚拟设备交互技术设计出基于 Unity3D 的绞吸式挖泥船虚拟仿真系统，很好地实现了绞刀切削技术方面的仿真，并在切削系统中加入了水底地形的反馈变化、泥砂石块的碎裂模拟以及管道中泥砂流向的路径模拟效果，同时支持 Oculus 立体眼镜和 Kinect 等最新虚拟现实交互设备，最后发布在安卓、苹果等多媒体平台。该系统克服了绞吸式挖泥船复杂工况的限制，结合最新的虚拟现实交互设备很好地实现了挖泥船施工场景的仿真模拟，辅助学习人员反复培训演练，从而大幅度降低了挖泥船船员的训练成本，更好地保证了实地工程作业的安全性和高效性。

## 1 系统构架设计

绞吸式挖泥船仿真系统是一项复杂的虚拟操作系统工程，系统结构设计上要兼顾环境仿真、操作仿真以及虚拟设备交互等环节，我们利用 Unity3D 软件搭建系统的总体结构主要分为四大模块：三维船体信息展示系统、挖泥船施工操作系统、场景仿真和漫游系统、虚拟设备交互系统(如图 2 所示)。

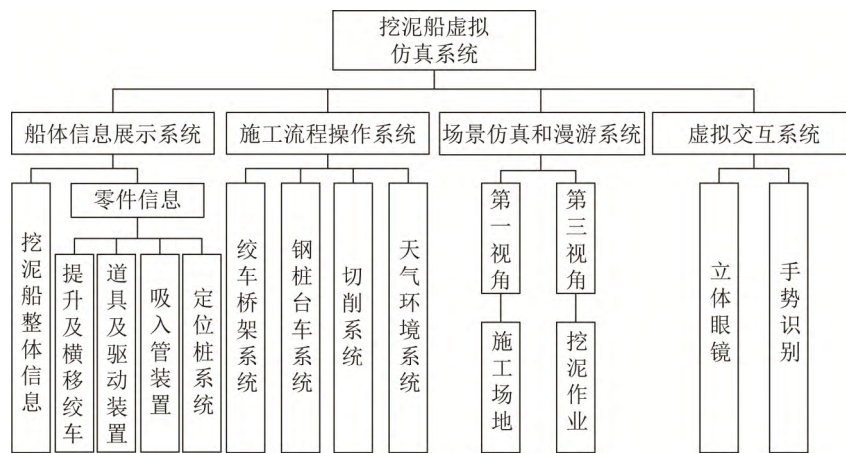


图 2 挖泥船仿真系统结构框图

在 Unity3D 中,我们通过 NGUI 插件设计整个系统界面(如图 3(a)所示)。船体信息展示系统采用了 3ds Max 建模软件以及数据库技术,以天津航道局的“天鲸号”绞吸式挖泥船<sup>[6]</sup>为模板,实现了挖泥船的建模(如图 3(b)所示)和各部分零件信息的展示(如图 3(c)所示)。挖泥船施工操作系统分为绞刀桥架系统、钢桩台车系统、切削系统以及天气模拟系统。绞刀桥架以及钢桩台车中桥架钢桩的仿真采用了 Joint 代码的二次开发,实现了绳索拉伸收缩的物理模拟,很好地展现了挖泥船钢桩桥架的工作场景(如图 3(d)所示)。切削系统分为 2D 和 3D 视角:2D 视角通过 A\*寻路算法<sup>[7]</sup>模拟管道内泥沙的流动,实现了泥沙流向路径的模拟(如图 3(e)所示);3D 视角通过地形网格顶点的坐标变化、地形贴图变化以及石块碎裂,逼真地模拟了绞刀切削的水底工作效果(如图 3(f)所示)。天气系统采用了 Particle System 模拟出雨雪的粒子效果(如图 3(g)所示)。虚拟交互系统以 Unity3D 为平台辅以 Oculus 立体眼镜和 Kinect,实现了挖泥船场景的立体显示以及手势识别的人机交互操作(如图 3(h)所示)。最后,我们将整个挖泥船仿真系统通过 Unity3D 配合相应平台的开发软件发布在 PC、移动端以及网页等多个平台上(如图 3(i)所示)。



图 3 系统各模块示意图

## 2 系统关键技术

### 2.1 绞刀切削模拟

绞刀切削模拟就是在复杂地形上实现绞刀切削与地形环境反馈变化的模拟效果。绞刀切削是挖泥船作业流程中最关键的环节,切削过程的展示以及切削原理的分析是挖泥船船员培训课程中的重要组成部分,可以帮助挖泥船船员了解挖泥的核心技术,提高施工作业的效率,保证切削过程的安全生产操作。故绞刀切削模拟是绞吸式挖泥船虚拟仿真系统的核心部分。然而切削过程中绞刀转速、泥砂流动变化以及绞刀引起的水底深度变化等非常复杂,如何实现绞刀切削模拟的合理性和真实性是整个仿真系统实现的难点。为了解决绞刀切削模拟的难点,我们设计了三个核心方案来实现绞刀切削的模拟:基于网格变形的地形反馈变形、材质贴图变化反馈以及泥砂粒子和石块的模拟。

#### 2.1.1 基于网格的地形反馈变形

在虚拟场景中的地形反馈变形模拟主要是依靠模型的网格变形算法。在施工过程中,挖泥船与环境相互作用产生的数据,如泥浆浓度、绞刀转速、绞刀引起的水底深度变化等的数学模型非常复杂,它们受机械、洋流、沙质、流体力学等多方面因素的影响,这类数据在我国乃至全世界都没有相对成熟的数学模型。所以我们根据挖泥船实地工作的场景以及相关的实验数据建立了基于绞刀切削力的粘土地形趋势性仿真。

绞吸式挖泥船作业时绞刀的相关参数如图 4 所示,  $b$  是切削宽度,  $D$  是切削深度,  $\theta$  是切削角。

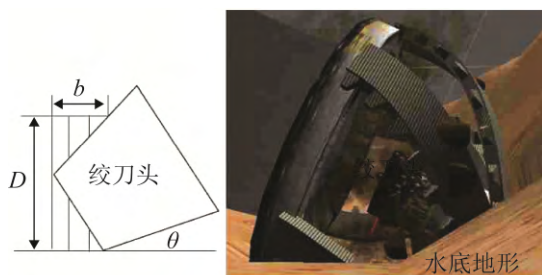


图 4 绞刀作业参数示意图

绞刀水底切削时,绞刀作用在泥土上的物理作用力必须大于该泥土材质的剪切强度。当我们固定水底地形材质为粘土材质,根据摩尔-库伦破坏理论,其剪切强度的计算如公式(1)为:

$$\tau = \sigma \times \text{tg} \varphi + c \quad (1)$$

其中  $c$  是粘土的凝聚力,这里假设  $c$  随着绞刀转速  $n$  成正比例增加,同时绞刀转速可以近似于绞刀头圆周速度和绞刀横移速度  $V_x$  之和。 $\sigma$  是由于上层泥土受挤压对下层泥土产生的法向应力, $\sigma$  的计算如公式(2)所示:

$$\sigma = \rho \times g \times D \times \text{tg} \varphi \quad (2)$$

绞刀切削力的计算如公式(3)所示:

$$f = (\rho \times g \times D \times \text{tg} \varphi + k \times (\frac{3}{k_1} \times n \times d + V_x)) \times d \times \frac{b}{\cos \theta} \quad (3)$$

式中: $\rho$  是黏土密度; $\varphi$  是土壤的内摩擦角; $V_x$  是挖泥船的横移速度; $k$  和  $k_1$  是变化系数; $n$  是绞刀转速; $d$  是绞刀直径。这里为了简化模型,假设切削面  $s$  的数值近似于绞刀直径和切削宽度的乘积除以  $\cos \theta$ ,所以绞刀切削力就是切削面积和粘土剪切强度的乘积。

本系统将绞刀切削力作为地形网格变形的关键要素控制地形网格的凹陷程度,故整个网格地形的变化符合实际施工场景时水底泥砂的变化。网格坐标的变化如公式(4):

$$\begin{aligned} x &= x - \frac{\sqrt{f \times d \times \sin 2\theta}}{4\omega} \\ y &= y - \frac{\sqrt{f \times D \times \sin 2\theta}}{4\omega} \end{aligned} \quad (4)$$

绞刀实际环境作业时搅碎的泥砂会有一部分遗留在水底,真实地模拟出泥砂残留的效果也是绞刀切削模拟中的重要环节。为此我们总结出泥砂残留的体积如公式(5)所示:

$$V_s = \sum S \times \Delta H \quad (5)$$

$$S = \frac{2V_x \times \sqrt{d^2 - V_x^2} + 3.14d^2 - d^2 \times \arcsin \sqrt{1 - \frac{V_x^2}{d^2}}}{4} \quad (6)$$

其中公式(6)中  $d$  是绞刀直径,我们将绞刀切

削时绞刀的切削直径近似等于绞刀的直径。绞刀平移切割时切割的横截面积如上述公式所示并通过积分求出遗留泥砂的体积  $V_s$ , 最后根据  $V_s$  的变化控制相应地粒子数量实现遗留泥砂的效果模拟。

在 Unity3D 中完成网格变形的两个关键因素就是网格顶点的坐标和顶点的法线方向, 通过控制网格顶点坐标的变化和法线的方向变化才能够真实地模拟出水底变形的场景。主要分为以下 4 步:

第 1 步, 设计触发条件, 就是指触发地底网格模型变形的前提条件。我们采用 Unity3D 软件自带的碰撞检测功能。

第 2 步, 顶点筛选。筛选顶点的时候, 我们遍历整个地形网格区域内的所有顶点, 筛选出绞刀碰撞点周围符合条件的顶点保存至空数组。

第 3 步, 设计顶点网格变形函数, 参考上文提到的变形公式改变筛选出来的网格顶点坐标。

第 4 步, 临时数组中顶点变化后的坐标数据用到对应网格的顶点坐标, 实现整个地形网格的反馈变形(如图 5 所示)。

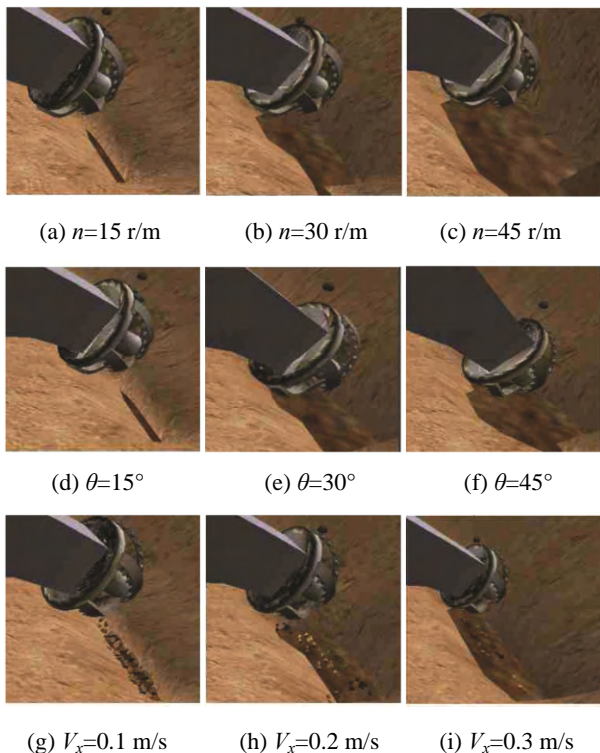


图 5 泥砂消失情况与绞刀转速对比图

系统进行绞刀切削模拟时, 我们保持其他变量恒定不变, 通过改变绞刀转速  $n$ 、绞刀切削角  $\theta$  以及绞刀横移速度  $V_x$  分别得到相应地水底地形模拟效果。通过观察图 5 的仿真模拟效果, 我们可以得出这样一个结论: 当绞刀转速  $n$ 、绞刀切削角  $\theta$  以及绞刀横移速度  $V_x$  越大时, 水底泥砂的消失速度越快, 水底遗留的泥砂量越少。

### 2.1.2 贴图的反馈变化

贴图的反馈变化是通过改变变形区域内材质贴图的色值来模拟土壤深浅的效果。由于地形的反馈变化仅仅通过地形网格变形不足以达到理想的仿真效果, 所以我们设计了贴图反馈变化的机制。通过改变变形区域内网格顶点对应的贴图像素点色值, 系统能够真实地模拟出土壤深度变化的层次感。

贴图像素点转换如公式(7)所示:

$$\begin{aligned} \frac{b-y}{Y} &= \frac{c}{B} \\ \frac{a-x}{X} &= \frac{r}{B} \end{aligned} \quad (7)$$

我们假设一个矩形代表仿真水底地形,  $X$  是地形横向的坐标长度,  $Y$  是地形纵向的坐标长度。整个地形的材质贴图像素值是  $R * G$ 。如果矩形内任意  $A$  点是绞刀与地形的碰撞点位置,  $B$  点是矩形的一个边角坐标为  $(x, y)$ , 也是材质贴图像素的坐标原点。我们通过  $A$  点坐标  $(a, b)$  在整个矩形坐标区域内的比值可以求出  $A$  点对应整个矩形贴图的像素坐标的比值, 进而求出  $A$  点的像素坐标  $(r, c)$ , 从而找到  $A$  点在贴图中对应的位置。

在 Unity3D 中, 整张材质贴图的像素点达几万甚至十几万个。如果我们遍历整张贴图的像素点, 系统的运行速度会很慢, 故根据碰撞点的像素点位置划分出周围基于绞刀投影的像素点正方形区域内的像素点点群, 将符合变形条件的像素点集合保存至空数组中。最后, 我们按照一定的色值比例改变数组中像素点的色值, 实现土壤材质贴图变化模拟。

### 2.1.3 石块模拟

绞吸式挖泥船清淤作业时,转动的绞刀周围会产生大量的泥砂和石块,所以在系统中添加了石块碎裂模拟以增强挖泥船作业时的视觉效果。通过数学上随机数生成的方法,系统在  $M*N$  的地形反馈变化区域内以随机数的方式产生小石块。

首先,我们通过 Prefabs(预设)不同形状的石块模型,然后通过随机数发生器选取一定范围内的任意数值作为石块模型 Instantiate 实例化后的坐标值,再配合泥砂飞溅的粒子效果较好地实现了石块碎裂的视觉模拟效果。最后,我们结合地形网格和贴图的反馈变化,实现了整个绞刀水底切削场景的模拟。

本文实现的绞刀切削数学模型创造性地提出了地形受力与绞刀切削的网格变形的数学模型并通过建立绞刀切削力和地形变形计算模型、贴图反馈机制以及石块模拟实现了真实的水底切削模拟效果,这项技术在绞吸式挖泥船这块虚拟现实领域基本没有具体的地形变化的数学模型和实现效果图。相比于倪福生提出的三维地形与疏浚绞刀虚拟生成的切削模型,其没有考虑到水底地形土壤受力与绞刀转动切削的交互作用关系、水底遗留泥沙的数学模型建立以及水底地形随地形深度的贴图颜色反馈,所以本文的水底绞刀切削效果更好。

## 2.2 平面 2D 挖泥泥砂的路径模拟算法

平面 2D 视角就是以 2D 平面的方式模拟挖泥船绞刀作业时泥砂绞碎后的流向。相比于 3D 视角模拟吸泥管道内泥砂流向的不便,2D 视角能够简单直观的模拟出泥砂的流向。其中 2D 挖泥系统需要解决的就是单位时间内经绞刀粉碎的泥砂体积量、泥砂在管道中的流体运动以及泥砂固定路径的模拟问题。

单位时间内经绞刀粉碎的泥砂体积量  $V_p$  与绞刀的切削长度  $d$  成反比,且与不同的土质有关。 $d$  的计算如公式(8)所示:

$$d = \frac{V_x}{P \times n} \quad (8)$$

其中: $P$  是绞刀臂数, $n$  是绞刀转速(单位: r/s),泥砂的切削长度  $d$  定义为单位时间内每个绞刀臂转一圈绞刀切削的距离,当绞刀切削距离越大,泥砂量就越少。

在疏浚工程中,泥浆管道输送阻力变化影响到泥浆管道输送系统的效率和能耗,是泥沙管道中的流体运动模拟的重要组成部分。首先,管道中泥浆运动模拟我们采用了非均质悬浮流泥浆模拟,管道上半层与下半层存在浓度差,下层的浓度高于上层。当泥砂体积量  $V_p$  增大、泥砂流速  $v$  降低或输送阻力  $F$  增大时,泥沙颗粒可能会存在管道底部并沿管壁向前滑动运动。然后,我们计算管道中阻力对泥沙运动的影响。泥沙管道内的阻力分为摩擦阻力、重力沉降阻力和碰撞阻力。本文采用 Wilson 提出的著名的泥浆管道输送阻力损失计算方法进行计算分析。我们假设整个管道为理想的笔直管道。阻力损失计算如公式(9)所示

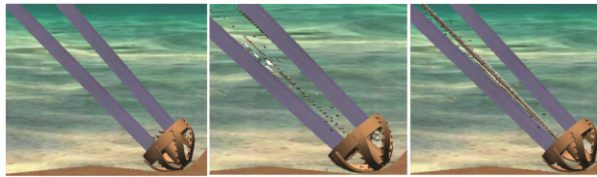
$$I = 0.22V_p(S-1)\left(\frac{v}{v_{50}}\right)^{-M} + I_w \quad (9)$$

式中: $V_p$  为泥浆体积量; $S$  为泥浆比重; $v$  为泥浆流速; $v_{50}$  为参考流速; $M$  是与泥沙颗粒大小分布有关的系数; $I_w$  是管道清水的阻力损失。这样我们通过阻力损失变化公式建立泥沙管道内的运动数学模型。最后,当泥砂体积量  $V_p$  增大、泥砂流速  $v$  降低或输送阻力  $F$  增大时,泥浆运动从非均质悬浮流泥浆模拟转变成管壁向前滑动运动模拟,泥沙运动的模拟通过 2D 视角表现出来。

我们采用了寻路路径的机制解决泥砂固定路径模拟的问题。泥砂运动的终点处设置一个标志物,在需要模拟的曲线路径下每隔一段距离设置寻路标志物,运用 A\*寻路算法原理设计整个寻路路径,这样泥沙颗粒就会按照标志物的轨迹运动,实现泥砂固定路径的模拟。

我们在 Unity3D 中利用 A\*寻路算法机制模拟吸泥管道中的泥砂路径,以最短的路径设计出消耗最小的一条路径,每隔一段距离设置 Cube 标志物,最后在终点处设置碰撞体以销毁到达目的地的泥

砂物体, 节约整个系统的运行资源。平面 2D 的两种泥砂运动效果如图 6 所示。



(a) 绞刀未工作时 (b) 非均质悬浮流 (c) 滑动运动模拟  
图 6 平面 2D 挖泥模拟视角

### 2.3 虚拟交互系统

我们通过虚拟现实设备的接口扩展以及代码的二次开发, 设计了支持 Unity3D 平台的立体眼镜和体感系统的虚拟现实交互系统。为了进一步增强虚拟现实的沉浸感, 实现更好的虚拟仿真效果, 我们使用 Oculus<sup>[8]</sup> 虚拟现实眼镜设计虚拟场景的显示模块以及 Kinect 体感系统作为交互设备模块, 这样我们可以通过 Oculus 看到挖泥船模型以及界面的 3D 虚拟效果, 通过 Kinect 接收人体做出的手势信息并识别从而实现相应的挖泥船工作流程操作。在 Unity3D 中, Oculus 利用人的左右眼获取信息差异使得左右眼屏幕分别显示左右眼的图像(如图 7(a)所示)。当我们穿戴上 Oculus 虚拟现实眼镜时, 在脑海中产生 3D 立体感, 使得系统模拟出的挖泥船工作效果更加逼真。



(a) 场景 Oculus 眼镜虚拟效果



(b) Kinect 识别手势向左挥动

图 7 手势识别控制绞刀移动

Kinect 体感系统<sup>[9]</sup>模块是以 Kinect 作为交互设备, 采用了基于算法的手势识别系统, 实现了人的

手势与仿真系统之间的自然交互。绞吸式挖泥船的一些基本操作如表 1 所示。

表 1 挖泥船操作与 Kinect 对应手势指令

挖泥船操作	手势动作识别	挖泥船操作	手势动作识别
返回主界面	左手握拳	主副桩上升	左手向上摆动
钢桩操作界面	左手一指	主副桩下降	左手向下摆动
桥架操作界面	左手两指	主副桩前移/绞刀向左	右手向左摆动
切削操作界面	左手三指	桥架横移/绞刀向右	右手向右摆动
放锚/绞刀架下降	右手向下摆动	船体转动/绞刀转动	左手向左右两边摆动

本文采用了基于算法的手势识别系统, 其具有较高的识别精度, 从而提高了挖泥船仿真系统的操作性以及船员与仿真系统之间的互动性, 而且易于编写, 方便仿真系统以后的维护和调试。本文就右手向左摆动对实现的手势识别系统分析。首先, 我们通过 Kinect 对用户手部的运动轨迹进行跟踪与采集, 通过算法计算规定时间内拇指指尖位置离开中间姿势区域的次数识别该手势。中间姿势区域是一个以胳膊肘为原点并给予一定阈值的区域。然后在 Unity3D 中, 我们定义了该手势识别的处理规则和条件。最后, 测试仿真系统的操作手势(如图 7b 所示)。随着移动平台的迅速普及, 仅仅支持 PC 端的传统虚拟仿真系统渐渐无法满足人们的需求, 所以我们将绞吸式挖泥船三维虚拟仿真系统分别发布在 PC 端、移动端以及网页端。

### 3 结论

本文将新兴的虚拟现实技术和挖泥船培训相结合, 通过 Unity3D 完成了绞吸式挖泥船的虚拟仿真系统。该系统以“天鲸号”绞吸式挖泥船为模板, 针对传统的虚拟仿真系统的一些不足, 结合了仿真算法的二次开发、绞刀地形切削的算法公式和虚拟现实交互设备, 实现了绞吸式挖泥船信息展示、施工展示和操作训练等功能, 其中较为完善地实现了

(下转第 2084 页)

度变化合理,能较好地模拟增益变化产生的回波强度和形状变化,与以往以二维模型为基础的扫描线求交算法生成的航海雷达图像相比,回波图像真实感有了明显的提升。从本文第 3 节可以看出,目前求回波强度的方法仅考虑了回波强度中的 diffuse 分量,下一步将考虑增加 specular 分量对回波强度仿真计算的影响。

### 参考文献:

[1] 金一丞,尹勇.航海模拟器 [M].北京:科学出版社,2013:331-352.  
[2] Ranaweera W, Jabbar S, Wickramarachchi R, et al. A Lightweight Approach to Simulate a 2D Radar Coverage for Virtual Maritime Environments [C]// Computer Science & Education (ICCSE), 2013 8th International Conference on. USA: IEEE, 2013: 402-406.  
[3] D'Amato J P, Bauza C G, Boroni G, et al. Real-Time Aircraft Radar Simulator for a Navy Training System [J].

Computer Applications in Engineering Education (S1061-3773), 2013, 21(4): 606-613.

[4] John N Briggs.航海雷达目标检测 [M].北京:电子工业出版社,2009.  
[5] 赵登平.世界海用雷达手册 [M].北京:国防工业出版社,2012.  
[6] 焦培南,张忠治.雷达环境与电波传播特性 [M].北京:电子工业,2007.  
[7] Rec. ITU-R P.676-6: Attenuation by atmospheric gases [S]. 2005.  
[8] Rec. ITU-R P.838-2: Specific attenuation model for rain for use in prediction methods [S]. 2003, 4.  
[9] Rec. ITU-R P.840-3: Attenuation due to clouds and fog [S]. 1999.  
[10] 杨万海.雷达系统建模与仿真 [M].西安:西安电子科技大学出版社,2007.  
[11] 孟章荣.各种颜色模型选用需求分析 [J].中国图象图形学报,1996,1(3):238-241.

(上接第 2075 页)

绞刀切削的数学模型的建立以及相对应的地形变化的环境模拟,具有较好的仿真效果和人机互动性。它不仅可以用于船员的虚拟培训,还可辅助挖泥船工程进行工程预测。此外,本文在考核模块的设计、绞刀切削的数学模型选择还需要进一步的实验设计,在未来的工作中我们将进行重点研究。

### 参考文献:

[1] 王翰涛,鲁力群,王秀景.绞吸式挖泥船绞刀系统技术现状及发展 [J].机电设备,2014(6):10-16.  
[2] 张安鸿,倪福生.绞吸船三维图形仿真与变速控制研究 [J].系统仿真学报,2010,22(6):1520-1523.  
[3] 孙俊,陆畅,逢守文.船舶机舱虚拟现实仿真系统的实现方法 [J].系统仿真学报,2007,19(15):3456-3459.

[4] 闫文珠,刘成,李磊民,等.基于 VR 技术的机器人核事故训练平台研究 [J].计算机仿真,2015,32(9):395-399.  
[5] 倪福生,赵立娟,顾磊,等.绞吸挖泥船疏浚仿真研究 [J].系统仿真学报,2012,24(11):2271-2274.  
[6] 何炎平,冯长华,顾敏童,等.“天鲸”号大型自航绞吸式挖泥船 [J].船舶工程,2009,31(5):1-5.  
[7] Downey S, Charles D. Distribution of Artificial Intelligence in DigitalGames [J]. International Journal of Intelligent Information Technologies (S1548-3657), 2015, 11(3): 1-14.  
[8] Rubin P. The Inside Story of Oculus Rift and How Virtual Reality Became Reality [J/OL]. (2014-05-20) [2016-05-31]. <http://www.wired.com/2014/05/oculus-rift-4/>  
[9] Simon Choppin, Jonathan Wheat. The potential of the Microsoft Kinect in sports analysis and biomechanics [J]. Sports Technology (S1934-6182), 2013, 6(2): 37-41.