

视景仿真中液压挖掘机与地形的动态交互

张红彦 于长志 赵丁选 刘金锋

(吉林大学机械科学与工程学院, 长春 130025)

摘要 液压挖掘机视景仿真系统通过采用 ROAM 算法动态管理和实时绘制地形网格, 并利用 Bézier 曲面方法设定控制点的运动路径, 以逼近铲斗内土壤表面形状的方法, 实现了液压挖掘机与三维地形的动态交互, 逼真地实现了挖土和卸土效果的模拟。开发的视景仿真系统为驾驶培训人员提供了逼真的、具有高度沉浸感的虚拟内部操作场景, 真实感强, 具有极佳的交互性。

关键词 视景仿真 ROAM 算法 贝塞尔曲面 动态交互

中图法分类号 U415.51 TP391.9; **文献标志码** A

从近几年工程机械的发展来看, 挖掘机的发展相对较快、需求量大, 被广泛应用到基础设施建设中, 已经成为工程建设中最主要的工程机械之一。而目前, 挖掘机的驾驶培训也只能在真实的产品样机上来进行; 同时实地驾驶训练不仅受天气和环境的影响, 也存在高油耗和高危险性等问题。为了降低训练成本, 节约经费, 提高训练质量, 达到训练安全, 缩短训练周期, 降低环境污染的目的, 越来越多的工程机械驾驶训练系统得到开发利用^[1]。而目前, 工程机械车辆驾驶模拟器多基于 Unity3D、RecurDyn、Vega Prime 等商业图形引擎^[2,3], 没有自主知识产权, 而且在挖掘机的视景仿真中存在很多问题。例如, 缺乏实时的、具有高度真实感的挖掘机与土壤的动态交互效果。

针对以上问题, 依托 OpenGL、OpenSceneGraph 等开源图形接口, 设计并开发了基于虚拟现实的液压挖掘机驾驶模拟训练系统, 实现了挖掘机与三维地形的动态交互。挖掘机与三维地形间的动态交互, 主要指挖掘机工作时的挖土及倒土效果的模拟。系统采用 ROAM (Real-time Optimally Adapting Mesh) 算法和 Bézier (贝塞尔) 曲面方法逼真地实现

了挖土和卸土效果的真实模拟, 通过三维渲染引擎提供了逼真的、高度沉浸感的挖掘机操作虚拟内部环境, 为驾驶培训人员提供了高度的沉浸感。

1 系统组成

设计开发的液压挖掘机动态模拟驾驶训练系统, 如图 1 所示, 主要由驾驶模拟舱与操纵系统、图形与声音生成系统、动感生成系统和计算机系统四部分组成。

驾驶模拟舱与操纵系统为驾驶培训人员提供高度沉浸感和交互性的外部环境, 系统中驾驶舱在原车驾驶室的基础上改装而成, 其内部结构保持不变, 但在原驾驶室各玻璃窗的外部安装高分辨率的大屏幕电视, 使得从驾驶员的角度向各窗户看出去, 只能看到各显示屏幕, 而看不到电视的外框与接缝。由于安装的电视参差不齐, 为了获得较好的外观, 在整个驾驶舱的外部进行了蒙皮处理, 如图 1 所示。操纵装置采用原挖掘机的操纵装置, 并加装传感器以采集操纵信号。

图像显示系统, 通过三维渲染引擎驱动, 将虚拟内部场景投影到玻璃窗外的电视屏幕上, 呈现虚拟场景中的图像, 但液晶电视在振动的环境下易损坏, 为此本模拟驾驶系统使用抗冲击、振动的等离子电视做为图像显示器, 与液晶电视相比, 它还具有动态图像显示效果好, 刷新频率高等优点。

动感生成系统用于模拟车辆的运动包括速度、

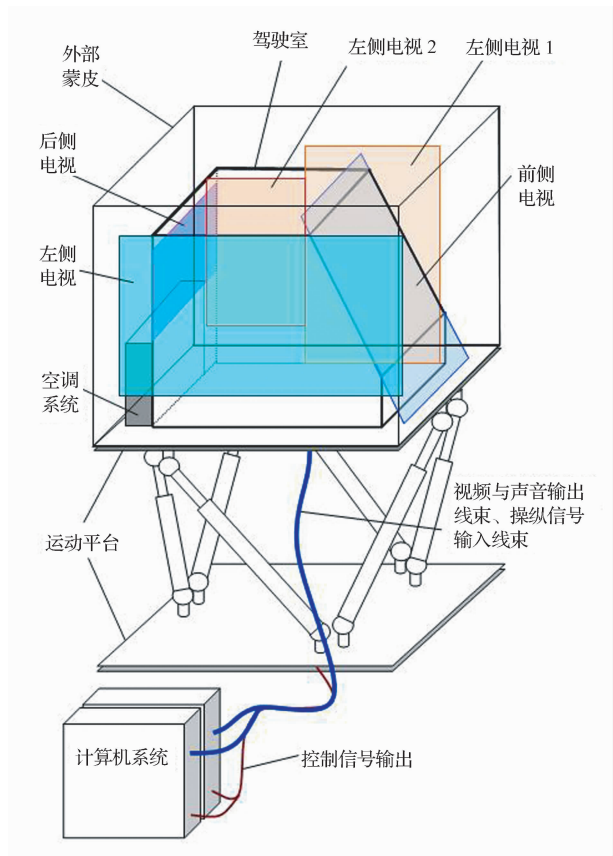


图1 系统的组成

加速度、位移等,为驾驶人员提供尽可能真实的运动感觉^[4]。系统中运动平台采用 Stewart 结构,如图 1 所示,它由上平台、下平台及连接二者的 6 个作动器构成,作动器采用交流电机伺服驱动。交流电机通过一个齿形带带动滚珠丝杠产生平移运动以驱动电动缸的伸缩。运动平台的上平台上安装驾驶模拟舱,下平台与地面连接。

计算机系统由一组高配置 PC 机组成,一方面负责本地的虚拟驾驶更新任务,主要包括液压挖掘机的动力学计算、虚拟场景的生成和多通道实时渲染,以及各种声音效果的模拟,如发动机的轰鸣声、碰撞声、鸣笛声等;另一方面公布和订购远端仿真主体的驾驶模拟数据,为处于不同物理位置的多用户实现同时在线模拟。

2 液压挖掘机操作臂的运动学方程

液压挖掘机的工作装置主要由动臂、斗杆、铲斗、连杆件机构、液压缸组成,其三自由度机构可根

据空间机构学中 D-H 法建立坐标系^[5,6],如图 2 所示,建立操作臂运动方程。采用 D-H 法描述相邻两杆的空间关系,逐次变换得到铲斗末端齿根坐标系 {4} 相对于机座坐标系 {0} 的位姿⁰T₄。

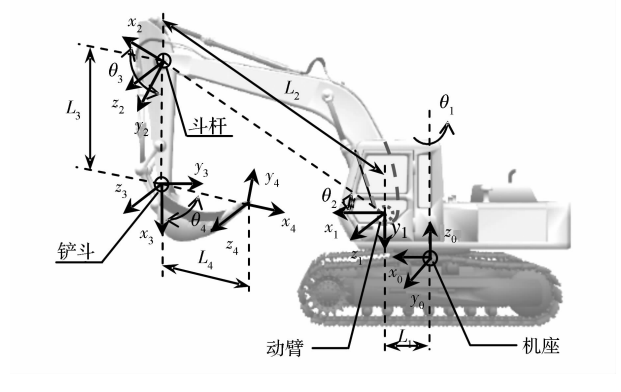


图2 挖掘机各坐标的设定

$${}^0T_4 = \begin{bmatrix} C_1 C_{234} & -C_1 S_{234} & S_1 & C_1 (L_1 + L_2 C_2 + L_3 C_{23} + L_4 C_{234}) \\ S_1 C_{234} & -S_1 S_{234} & -C_1 & S_1 (L_1 + L_2 C_2 + L_3 C_{23} + L_4 C_{234}) \\ S_{234} & C_{234} & 0 & L_2 S_2 + L_3 S_{23} + L_4 S_{234} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式(1)中, $S_i = \sin\theta_i$, $C_i = \cos\theta_i$, $S_{ij} = \sin(\theta_i + \theta_j)$, $C_{ij} = \cos(\theta_i + \theta_j)$; $i = 1, 2, 3, 4$ 。

L_i 是从 z_{i-1} 到 z_i 沿着 x_i 的距离, θ_i 是从 x_{i-1} 到 x_i 绕 z_{i-1} 的转角。

通过运动方程可以实时地得到铲斗末端的位姿,并比较铲斗末端的位置和地形的高度,判断铲斗是否和地形产生碰撞。

3 液压挖掘机与地形的动态交互

挖掘机以地表物体为作业对象,工作时往往会引起地形的动态改变,为提高模拟的真实性,视景仿真引擎必须支持地形高度的实时改变和地表纹理的动态渲染,从而实现挖掘机工作时的挖土及倒土效果的真实模拟。

3.1 地形网格的生成

动态地形的高度采样数据以灰度图的形式进行描述和存储,高度数据在被视景仿真引擎构建地形网格时载入,它在计算机中被描述为一个二维数

组,根据地形上某点的二维坐标位置可以方便的得到该点的地表高度值,从而实现对地表形状的建模。高度图通常以位图的方式保存,灰度图中像素点较暗,对应的三维地形高度较低;反之,像素点较亮的区域,则对应海拔较高的地形。

针对本挖掘机驾驶模拟系统而言,地形的动态变形区域在三角形网格上要求有更高的层次细节,发生在铲斗与地形的接触点附近,且位置与车辆的运动相关,具有一定的不可预知性。若采用传统的、以较高分辨率的多边形网格来构建仿真系统的动态地形,不仅难以保证视景渲染的实时性,而且也会造成内存的巨大浪费。因此,为了实现图形渲染的实时性和真实感,现选择 ROAM 算法动态管理和绘制地形网格。ROAM 算法会根据视点的位置来生成和更新二叉三角树,首先设置一个阈值,然后获取当前视点的位置,根据比较视点的位置和阈值间的关系将每个地形分片的根节点(两个等腰三角形)分割或合并至相应的细节等级,通过分割或合并操作实时地调整三角形网格,生成多分辨率的地形模型^[7,8]。

在挖掘机行驶过程中,挖斗附近区域的地形表面多边形网格的层次细节将被动态提高,并将实时更改地形表面与铲斗相接触区域的高度数值,以模拟具有高度真实感的挖土和倒土作业效果。当视点离开变形区域时,再通过合并操作降低该区域的层次细节。同时系统根据设置最高细分程度阈值,保证变形区域的多边形网格不被过度细分,保证系统实时性。

3.2 动态交互

为实现铲斗和地形的动态交互,系统采用三维贝塞尔曲面方法模拟铲斗内不同工作过程下的土壤生成效果。给定空间的 $(m+1) \times (n+1)$ 个点 P_{ij} 的张量积参数曲面为 $m \times n$ 次的贝塞尔曲面方程如式(2)^[9]。

$$p(u, v) = \sum_{j=0}^n \sum_{i=0}^m P_{i,j} B_{j,m}(v);$$

$$(u, v) \in [0, 1] \times [0, 1] \quad (2)$$

式(2)中, $B_{i,n}(t) = C_i t^i (1-t)^{n-i}$; $t \in [0, 1]$ 。 $m = n = 3$, $P_{i,j}$ 代表控制点,决定曲面的生成形

状, $i, j = 0, 1, 2, 3$ 。

$P(u, v)$ 的矩阵形式可写为

$$P(u, v) = UM \begin{bmatrix} P_{0,0} & P_{0,1} & P_{0,2} & P_{0,3} \\ P_{1,0} & P_{1,1} & P_{1,2} & P_{1,3} \\ P_{2,0} & P_{2,1} & P_{2,2} & P_{2,3} \\ P_{3,0} & P_{3,1} & P_{3,2} & P_{3,3} \end{bmatrix} M^T V \quad (3)$$

式(3)中 $U = [1, u, u^2, u^3]$, $V = [1, v, v^2, v^3]^T$,

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ -3 & 3 & 0 & 0 \\ 3 & -6 & 3 & 0 \\ -1 & 3 & -3 & 1 \end{bmatrix}。$$

由公式(3)可知,贝塞尔表面的生成效果取决于控制点($P_{i,j}$)的选择,改变控制点的位置和数量,相应的贝塞尔曲面的形状和精确度也就随之改变。另外,挖掘机铲斗在不同挖土工作位置,铲斗中土壤的表面形状也不同,为此得到铲斗中土壤的体积 V 。

$$V = \iint_D \kappa(H_i - H_e) dx dy \quad (4)$$

式(4)中, $\kappa = \begin{cases} 1, & (H_i > H_e) \\ 0, & (H_i \leq H_e) \end{cases}。$

式(4)中, H_i 代表操作位置处的网格顶点高度值, H_e 代表挖掘机铲斗末端位置的高度。 D 代表挖掘区域投影在 xy 水平面上的面积。

$$\text{令 } \psi = \begin{cases} 0, & (V < V_{\min}) \\ V/V_{\max}, & (V_{\min} \leq V \leq V_{\max}) \\ 1, & (V > V_{\max}) \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中, $V_{\min}$ 和 $V_{\max}$ 代表铲斗容积的最小量和最大量。

因此得到贝塞尔曲面控制点的运动路径,如图5所示,当铲斗末端高度高于挖掘点地形高度即 $\psi \leq 0$ 时,控制点选择为 S_{ij} ;当铲斗末端高度低于挖掘点地形高度即 $0 < \psi \leq \psi_m$ ($0 < \psi_m < 1$) 时,控制点从 S_{ij} 移动到 M_{ij} ;当 $\psi_m < \psi \leq 1$ 时,控制点从 M_{ij} 移动到 E_{ij} ;并采用线性差值法来模拟曲面生成的中间过程。

在倒土操作中,系统实时检测铲斗末端的位置

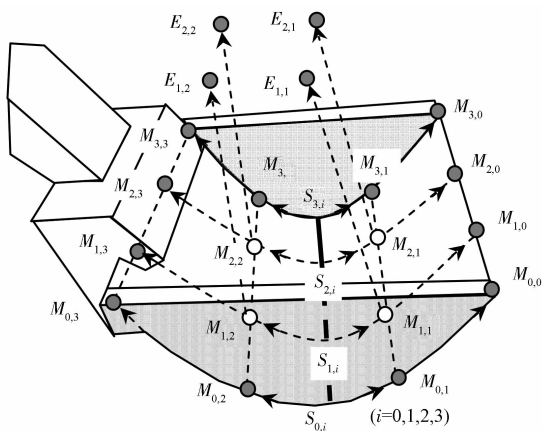


图3 贝塞尔曲面控制点的运动路径

并根据其位置生成土堆效果。为了渲染真实感的挖土和土堆的纹理效果,系统采用基于 GPU 的纹理融合技术,获得了逼真的地形渲染效果,挖土和卸土效果如图 4 和图 5 所示。



图4 挖土效果模拟



图5 卸土效果模拟

4 结论

设计开发的液压挖掘机动态模拟视景仿真系

统,实现了挖掘机作业区域地形网格的真实感渲染,逼真地实现了挖土和卸土效果的模拟,为驾驶培训人员提供了具有高度沉浸感的虚拟内部操作环境,具有完全的自主知识产权。液压挖掘机动态模拟驾驶训练系统,真实感强,具有极佳的交互性,为工程作业人员提供了经济、安全、有效的辅助训练手段^[10]。

参 考 文 献

- 1 段秀兵,朱诗顺. 工程机械驾驶模拟器运动平台多体动力学分析. 中国工程机械学报,2011;9(4):448—451
- 2 陈俊. 车辆驾驶模拟器视景仿真技术研究. 杭州:浙江大学,2012
- 3 苏明明. 基于 MultiGen Creator/Vega Prime 的液压挖掘机的可视化虚拟仿真. 成都:西南交通大学,2011
- 4 李营,黄海东,姚其昌,等. 六自由度驾驶模拟器视景仿真系统研究. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2005;29(3):388—391
- 5 王军,李世芸. 应用虚拟样机技术的液压挖掘机仿真分析. 现代制造工程,2009;11:139—142
- 6 陈玉峰. 液压挖掘机工作装置运动与动力综合优化研究. 重庆:重庆大学,2005
- 7 任远红,杨克俭. 视点相关的动态 ROAM 算法研究. 计算机与数字工程,2007;35(5):17—19
- 8 涂超. ROAM 算法原理及其应用研究. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2003;22(2):176—179
- 9 马培良,丁维龙,古辉. 基于 OpenGL 和双三次贝塞尔曲面的稻叶可视化建模. 浙江工业大学学报,2010;38(1):36—40
- 10 倪涛,张红彦,赵丁选,等. 大型特种车驾驶模拟系统视景引擎开发. 北京理工大学学报,2011;31(8):892—895

Dynamic Interaction between Hydraulic Excavator and Terrain in Visual Simulation

ZHANG Hong-yan, YU Chang-zhi, ZHAO Ding-xuan, LIU Jin-feng

(College of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130025, P. R. China)

[Abstract] In order to dynamically manage and render the terrain mesh in real time, the ROAM algorithm to use is put out. Furthermore Bezier curved surface method is used to construct the surface of excavated soil by setting the path of control points, the visual scene simulation realizes the dynamic interaction between excavator and 3D terrain, and creates a realistic visual appearance of different operation regions on terrain such as excavated areas and dumped soil during the excavator simulation. The visual scene simulation system has a very strong sense of reality and an excellent interactivity, so that provides the driving training personnel realistic, highly immersive virtual internal operation scene.

[Key words] visual scene simulation ROAM algorithm Bezier curved surface dynamic interaction