

基于 OpenGL 空间机械臂三维重构可视化研究

李泰国,李文新,王伟文,高家祺

(兰州空间技术物理研究所,甘肃 兰州 730000)

摘要: 机器臂存在结构复杂、真实设备成本昂贵、实验条件受限等问题。在机械臂的设计研究中,可视化仿真系统作为一种安全灵活的工具,发挥着非常重要的作用,并广泛应用于机械臂设计和开发的各阶段。利用专业建模软件 3D Studio MAX 建立机械臂三维模型及场景,然后转换为 OpenGL 可以识别的 3DS 模型数据格式。在 Visual C++ 开发环境中完成 3DS 模型数据的读取,结合 OpenGL 进行机械臂三维模型的重绘。根据机械臂 D-H 参数完成的机械臂正逆运动学求解算法,可以嵌入基于 OpenGL 的空间机械臂三维仿真系统中完成机械臂的运动控制和路径规划。实验结果表明,在 Windows 环境下以 Visual C++ 结合 OpenGL 技术进行机械臂三维重构可视化研究,便于嵌入用户控制算法,可为机械臂的运动控制和路径规划研究提供依据。

关键词: 空间机械臂;三维模型;3DS;OpenGL;可视化系统

中图分类号: V11

文献标识码: A

文章编号: 1673-629X(2018)01-0178-04

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2018.01.038

Research on Visual 3D Reconstruction of Space Manipulator Based on OpenGL

LI Tai-guo, LI Wen-xin, WANG Wei-wen, GAO Jia-qi

(Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou 730000, China)

Abstract: There are some problems in the space manipulator like complex structure, expensive devices and the limitation of experimental conditions. In the design and research of manipulator, visual simulation system, as a safe and flexible tool, plays a very important role and is widely used in each stage of the design and development of the manipulator. 3D Studio MAX, a professional modeling software, is for establishment of three-dimensional model and scene of the manipulator, and then converted into 3DS data format which OpenGL can identify. In Visual C++ development environment, the 3DS model data is read and combined with OpenGL three-dimensional model of manipulator is redrawn. According to the forward and inverse kinematics of the manipulator algorithm completed by the manipulator D-H parameters, it can be embedded in the three-dimensional simulation system based on OpenGL space manipulator to complete the manipulator motion control and path planning. The experiment shows that under the Windows using Visual C++ and OpenGL for research on visualization of 3D reconstruction for manipulator, it is convenient to embed user control algorithm, which can provide the basis for research on manipulator motion control and path planning.

Key words: space manipulator; 3D model; 3DS; OpenGL; visual system

0 引言

随着空间探索的不断深入,空间机械臂应用技术已经成为空间技术的重要研究方向。由于机器臂结构复杂、真实设备成本昂贵、实验条件受限等问题,会对机械臂的实验研究开展带来一定难度。因此,在机械臂的设计研究中,图形仿真系统作为一种安全灵活的工具,发挥着非常重要的作用,并广泛应用于机械臂研究和开发的各个方面。机械臂图形仿真涉及机械臂机

构学、运动学、零件建模、机械臂三维实现、运动控制和机械臂路径规划,是一项综合性的有创新意义和实用价值的研究课题。因此针对机械臂在不同平台下(如 OpenGL、MATLAB 机器人工具箱、LabView、ADAMS 等)不同性能的仿真试验,给机械臂的研究带来了便利。能够为机器臂结构方案与相关设计提供强有力的支撑;能够有效地帮助设计师掌握机械臂工作空间的形态和极限;也能够为离线编程人员提供一种有效的

收稿日期:2017-01-07

修回日期:2017-05-03

网络出版时间:2017-09-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11605080)

作者简介:李泰国(1985-),男,工程师,研究方向为空间物理电子学、机械臂;李文新,研究员,研究方向为空间物理电子学。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20170927.0958.058.html>

验证手段;还能帮助检测机械臂的工作环境与机械臂之间是否存在干涉,以保证机械臂运行的绝对安全等^[1-4]。

目前,存在多种设计软件方便进行机械臂的仿真研究,包括三维设计软件 UG、Pro/E、Solidworks,仿真软件 ADAMS、机器人专用软件 WorkSpace、专用计算软件 Matlab 等。但是从三维建模,嵌入控制算法,实现 3D 仿真难易程度等多方面进行分析,发现 UG、Pro/E、Solidworks 等在机构仿真方面有一定的优势,但是难以满足机械臂控制仿真的要求;ADAMS 和 WorkSpace 等仿真软件在嵌入用户开发算法方面存在明显的不足;Matlab 在算法开发和正确性验证方面有优势,但是难于直接对控制器进行驱动。而 OpenGL 是一个跨平台、开源的图形程序接口,具有较好的可视化功能,能够为仿真及场景可视化提供较好的环境,可使用光效、雾效、纹理等特效功能,模拟现实世界物体对光的反射、散射原理,增强了曲面的材质感和临场感,达到了良好的现实逼真效果。采用 OpenGL 技术,在 Windows 环境下以 Visual C++ 为基础进行机械臂三维重构可视化研究,便于嵌入用户控制算法,满足机械臂控制仿真的要求。

1 模型建立及数据转换

在计算机图形学中有两种方式表示三维模型:多边形构成和 NURBS 曲面构成。在三维图形的绘制过程中,如果直接利用 OpenGL 库提供的基本几何体构造复杂的图形是相当困难的。原因在于 OpenGL 只能通过基本的几何图元点、线及多边形建立三维模型,但是它不提供建立三维模型的高级命令。此外,如果直接利用 OpenGL 绘制复杂三维模型,则需要在程序设计时使用大量的绘图语句。这样 OpenGL 程序在运行时将占有大量内存,导致程序执行效率降低,相应地会增加程序设计的复杂度和工作量;并且程序的通用性和简便性很难满足,给系统的开发带来了极大困难。

由于 OpenGL 对模型的数据格式相对比较通用,没有特殊的要求。在仿真研究过程中比较可取的做法是先利用专业建模软件(如 3D Studio MAX、Pro/E 等)建立需要的三维模型,然后转换为 OpenGL 可以识别的模型数据格式(如 3DS 文件、STL 文件等),最后将创建的模型数据导入 OpenGL。然后在开发环境(Visual C++、LabView 等)中直接获取模型数据,结合 OpenGL 进行绘制及交互控制。该方法的优势在于可以利用专业建模软件 3D Studio MAX 的优点,快速建立复杂三维模型,还可以借助 OpenGL 的编程接口对模型进行实时绘制和交互控制,提高程序的执行效率,降低建模时间,加快系统开发进程^[5-8]。

1.1 3DS 文件的建立

利用 3D Studio MAX 软件创建模型并导出成 3DS 文件的流程如图 1 所示。

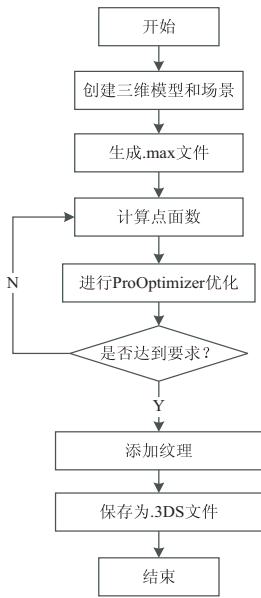


图 1 3DS 文件创建流程

1.2 3DS 文件结构

3DS 文件结构由 Chunk(块)组成,每个 Chunk 描述了诸如场景数据,每个编辑窗口的状态、材质、网格数据等^[9]。Chunk 由两部分组成:ID 和 Length(下一个数据的位置)。二进制的 3DS 文件采用小尾端格式存储,即低字节在前,高字节在后。3DS 中每个块的数据组织格式包括“块 ID”、“块长度”和“块数据”。

每个 3DS 文件都包括一个块 ID 是“0x4D4D”的基本块。基本块是在 3DS 文件中必须存在的,也可用于检测一个文件是不是 3DS 文件,它由 ID 为“0x3D3D”的编辑块和 ID 为“0xB000”的关键帧块组成。3DS 编辑块表明程序数据的开始,包括材质列表块、两配置块、视口定义块、物体定义块等。3DS 关键帧块表明开始定义关键帧信息。3DS 主要的几个块的 ID 及信息,包括(0xAFFF,材质信息开始)、(0xA000,材质名称)、(0xA300,材质纹理名称)、(0x4130,与三角面相关的材质信息)、(0x4000,模型中对象信息)、(0x4110,对象中定点信息)、(0x4120,对象中三角面信息)、(0x4140,纹理坐标)。

2 基于 OpenGL 和 VC++ MFC 的空间机械臂三维重构

2.1 OpenGL 与 MFC 的接口

为使 Windows 能正确执行 OpenGL 的 API 函数,首先必须对绘图环境进行初始化,只有在 OpenGL 绘制环境中,OpenGL 命令才能被接收并执行,所以必须创建 OpenGL 绘制环境。OpenGL 绘制环境初始化过

程如表 1 所示。

表 1 OpenGL 绘制环境初始化

代码	内容
HWNDhWnd = GetSafeHwnd()	获取窗口句柄
HDC hdc = ::GetDC(hWnd)	获取设备上下文
PixelFormat = ChoosePixelFormat(hdc, &pfid)	选择像素格式
SetPixelFormat(hdc, PixelFormat, &pfid)	设置像素格式
HGLRC = wglCreateContext(hdc)	创建渲染描述表
wglMakeCurrent(hdc, HGLRC)	设置当前绘图描述表
glEnable(GL_TEXTURE_2D)	启用 2D 纹理
glEnable(GL_DEPTH_TEST)	启用深度测试
glMatrixMode(GL_MODELVIEW)	指定模型视图矩阵
glLoadIdentity()	加载单位矩阵

2.2 空间机械臂 3DS 文件的读取

如 1.2 节所述,3DS 文件中采用的是块结构,并且块与块之间存在嵌套关系,所以可以采用递归的方法读取 3DS 文件中的三维模型数据。基于面向对象的程序设计思想,设计了 5 个类用于空间机械臂 3DS 文件的读取和重绘,分别是 tChunk (定义块信息)、t3DModel(定义模型信息)、t3DObject(定义模型对象信息)、tMaterialInfo(定义材质信息)和 tFace(定义顶点信息和纹理坐标信息)。3DS 文件读取的算法伪代码如下所述:

参数定义为:

ChunkLength:表示 3DS 文件长度;

ReadBytesLen:表示读出的数据字节数;

TempBytesLen:用于保存读出数据字节数的临时变量。

算法步骤:

Step1:初始化变量,打开 3DS 文件;

Step2:读取第一块数据的 ID 及数据长度 ChunkLength;

Step2.1:判断 ID 为 0x4D4D,ReadBytesLen 加 6,执行 Step3;

Step2.2:判断 ID 不为 0x4D4D,则执行 Step6。

Step3:读取下一块数据的 ID 及数据长度 TempBytesLen;

Step3.1:判断 ID 为 0xA000,则将解析后的材质名称保存至材质信息名称队列;

Step3.2:判断 ID 为 0xA020,则将解析后的材质颜色保存至材质信息颜色队列;

Step3.3:判断 ID 为 0xA200,则将解析后的纹理信息保存至纹理信息队列;

Step3.4:判断 ID 为 0xA300,则将解析后的材质文件名称保存至材质文件名称队列;

Step3.5:如果为其他 ID,忽略其数据信息。

Step4: ReadBytesLen = ReadBytesLen + TempBytesLen;

Step5:判断已读入数据长度 ReadBytesLen 是否小于块长度 ChunkLength;

Step5.1:如果 ReadBytesLen 小于或等于 ChunkLength,继续执行 Step3;

Step5.2:如果 ReadBytesLen 大于 ChunkLength,执行 Step6。

Step6:程序结束。

2.3 空间机械臂三维模型的重绘

将三维模型及场景数据从 3DS 文件读出后,需要在 OpenGL 环境下完成三维模型的重绘^[10-11]。三维模型重绘算法伪代码如下所述:

参数定义:

\vec{a}, \vec{b} :三角面的两个矢量;

\vec{n} :三角面的法向量;

\vec{n}_1 :用于三角面规范化法向量。

算法步骤:

Step1:计算 3DS 模型中各个面的法向量;

Step1.1:计算表示三角面的两个矢量 \vec{a}, \vec{b} ;

Step1.2:计算三角面的法向量 $\vec{n} = \vec{a} \times \vec{b}$;

Step1.3:规范化法向量, $\vec{n}_1 = \frac{\vec{n}}{|\vec{n}|}$;

Step1.4:保存计算后的各个面的法向量。

Step2:设置三维模型的材质纹理;

Step3:设置 OpenGL 绘图环境;

Step3.1:创建绘图描述表并设置像素格式;

Step3.2:初始化模型、大小;

Step3.3:设置光照、旋转角度、转速及模式。

Step4:遍历 3DModel 对象,对存储的对象逐一进行绘制,如果有纹理映射信息,则打开纹理映射;

Step5:开始以 ViewMode 模式绘制,先遍历所有的面,然后嵌套遍历三角形所有的点,获得面对每个点的索引。给出法向量,最后完成绘制;

Step6:根据机械臂运动学求解结果判断机械臂是否需要重绘;

Step6.1:如果是机械臂正运动学控制,则按从以太网接收到的机械臂各关节角的个数进行机械臂形状的重绘;

Step6.2:如果是机械臂逆运动学控制,则根据从以太网接收到的机械臂末端状态解算出各关节角,再进行机械臂形状的重绘。

Step7:程序结束。

3 空间机械臂参数

空间七自由度机械臂是一个完全结构对称的冗余型机械臂,与臂杆两端相连接的 3 个关节完全相同并且对称。通过对空间机械臂的结构特征进行分析,建立的空间机械臂 D-H 坐标系如图 2 所示,D-H 参数如表 2 所示。

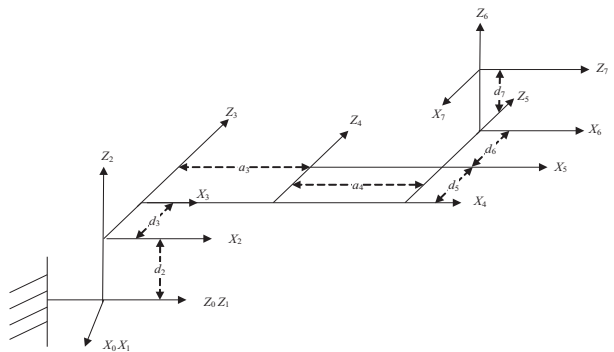


图 2 空间机械臂 D-H 坐标系

表 2 空间机械臂 D-H 参数

连杆 i	θ_i	d_i /mm	a_{i-1} /mm	α_{i-1}
1	θ_1	0	0	0°
2	θ_2	d_2	0	90°
3	θ_3	d_3	a_3	-90°
4	θ_4	0	a_4	0°
5	θ_5	d_5	0	0°
6	θ_6	d_6	0	90°
7	θ_7	d_7	0	-90°

其中, $d_2 = d_3 = d_5 = d_6 = d_7 = 515$; $a_3 = a_4 = 5\ 540$ 。根据机械臂 D-H 参数可以完成机械臂的正运动学和逆运动学的求解,根据正运动学的解算可以完成机械臂正运动的仿真控制;若已知机械臂末端执行器的坐标位置,则可以通过该位置坐标结合逆运动学求解公式计算出机械臂各个关节的角度值,可以完成机械臂的逆运动控制及路径规划控制。将机械臂的正逆运动学的求解算法嵌入基于 OpenGL 的空间机械臂三维模型中,通过利用图形程序接口来完成场景及三维模型的更新显示,以此可以达到动态显示三维仿真的效果^[12-14]。

4 空间机械臂三维可视化系统

4.1 系统架构设计

根据系统需求分析,空间机械臂三维可视化系统的整体架构设计如图 3 所示。

4.2 系统运行效果

在设计完成后,在 Visual C++ 环境下该系统的运行效果如图 4 所示。

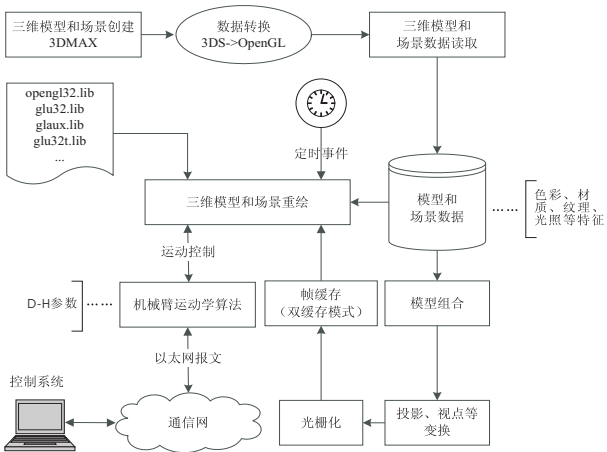


图 3 机械臂三维可视化系统架构

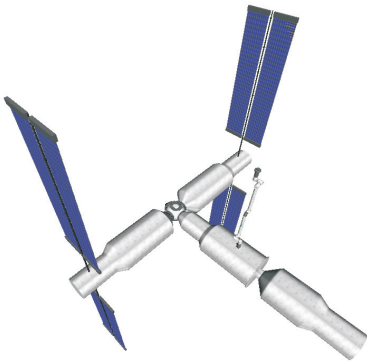


图 4 空间机械臂三维可视化系统运行效果

5 结束语

利用 3D Studio MAX 建模具有模型逼真形象、开发效率高的特点,完成空间机械臂三维模型及场景的创建。在 Visual C++ 6.0 环境下,完成三维模型数据 3DS 文件的读取与解析,采用 OpenGL 技术进行三维模型的重绘,大大降低了 OpenGL 建立复杂模型的难度。在此基础上,运用 OpenGL 对三维模型的处理技术,对三维模型场景进行实时渲染,使得生成的场景逼真,真实感强。建立的空间机械臂三维可视化系统可实现空间机械臂的运动学仿真,为进一步研究空间机械臂的路径规划研究奠定基础。

参考文献:

[1] 唐立才,张海涛,张敬鹏,等. 基于 OSG 的空间机械臂三维仿真平台的设计与实现[J]. 计算机测量与控制,2015,23(3):987-989.

[2] 廖 明,周良辰,闫国年,等. 基于 OpenGL 驱动的场景三维重建[J]. 计算机应用研究,2015,32(4):1276-1280.

[3] 董天平,马 燕,刘伦鹏. 基于 OpenGL 的工业化机器人仿真研究[J]. 重庆师范大学学报:自然科学版,2013,30(2):60-64.

[4] 陈 琳,戴 骏,冯俊杰,等. 基于 OpenGL 的多机器人仿

采集和融合方法进行控制器设计,通过自适应融合跟踪误差补偿实现无人机飞行轨迹跟踪控制算法改进。研究表明,采用该方法进行无人机飞行轨迹跟踪控制的精度较好,误差快速收敛到零,提高了无人机飞行中对不确定气流扰动的抗干扰性和稳健性,保障了飞行稳定。

参考文献:

[1] ZHANG J F, HAN Z Z, WU H. Robust finite-time stability and stabilization of switched positive systems[J]. IET Control Theory and Applications, 2014, 8(1): 67-75.

[2] NGOC P H A. Stability of positive differential systems with delay[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2013, 58(1): 203-209.

[3] 李煜琦,邵珠峰,田斯慧,等. 基于吊丝配重的空间机械臂零重力模拟装置卸载率分析及评价[J]. 机器人, 2016, 38(3): 293-300.

[4] 王 勋,张代兵,沈林成. 一种基于虚拟力的无人机路径跟踪控制方法[J]. 机器人, 2016, 38(3): 329-336.

[5] MAHBOUBI H, MOEZZI K, AGHDAM A G, et al. Distributed deployment algorithms for efficient coverage in a network of mobile sensors with nonidentical sensing Capabilities [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2014, 63(8):

3998-4016.

[6] 章 俊,张冬梅,王辛刚. 一类参数不确定连续正系统受限控制[J]. 信息与控制, 2015, 44(5): 592-597.

[7] 朱 熠,陈 欣,李春涛,等. 风扰动下的飞翼无人机静态投影控制[J]. 兵工学报, 2015, 36(7): 1237-1246.

[8] 雷旭升,陶 冶. 小型无人飞行器风场扰动自适应控制方法[J]. 航空学报, 2010, 31(6): 1171-1176.

[9] 刘 重,高晓光,符小卫,等. 基于反步法和非线性动态逆的无人机三维航路跟踪制导控制[J]. 兵工学报, 2014, 35(12): 2030-2040.

[10] 徐为民,徐 攀. 不确定扰动下双起升桥吊双吊具鲁棒自适应滑模同步协调控制[J]. 控制与决策, 2016, 31(7): 1192-1198.

[11] 葛立志. 基于全弹道控制分析的水下航行器攻击模型视景仿真[J]. 舰船电子工程, 2015, 35(3): 137-141.

[12] 刘 恒,李生刚,孙业国,等. 带有未知非对称控制增益的不确定分数阶混沌系统自适应模糊同步控制[J]. 物理学报, 2015, 64(7): 070503.

[13] 孙克辉,贺少波,董燕青. 简化洛伦兹混沌系统的追踪同步控制[J]. 信息与控制, 2015, 44(4): 393-397.

[14] THIAGARAJAN J J, RAMAMURTHY K N, SPANIAS A. Learning stable multilevel dictionaries for space representations[J]. IEEE Transactions on Neural Networks & Learning Systems, 2015, 26(9): 1913-1926.

(上接第 181 页)

真环境[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2014(9): 10-13.

[5] 李 新,李珊珊. 3ds 模型在 OpenGL 中的读取和重绘[J]. 首都师范大学学报:自然科学版, 2008, 29(2): 101-104.

[6] 万 鹏,姜立军,陈学东,等. 基于图像处理的外螺纹三维模型重构[J]. 图学学报, 2012, 33(1): 68-72.

[7] HERBORT S, WOHLER C. An introduction to image-based 3D surface reconstruction and a survey of photometric methods [J]. 3D Research, 2011, 2(3): 1-17.

[8] MERAT P, AGHILI F, SU Chunyi. Modeling, control and simulation of a 6-DOF reconfigurable space manipulator with lockable cylindrical joints [C]//International conference on intelligent robotics and applications. [s. l.]: [s. n.], 2013: 121-131.

[9] 刘志林,苏 丽. 基于 COSMOSMotion 的机械臂三维虚拟仿真[J]. 机械设计与制造, 2010(12): 92-94.

[10] Shreiner D. OpenGL 编程指南[M]. 王 锐,译. 第 8 版. 北京:机械工业出版社, 2014.

[11] 钱小平,杨庆华,荀 一,等. 基于 Java3D 的机械臂三维虚拟场景创建及运动学仿真[J]. 机电工程, 2014, 31(1): 47-51.

[12] CHEN M Q, GONG Y W. Research on technology of three-dimension Roam based on OpenGL[C]//International conference on computer application and system modeling. [s. l.]: [s. n.], 2010: 562-564.

[13] LIU N, PANG M Y. Rendering soft shadows with OpenGL based on planar projection method [C]//2nd international conference on network infrastructure and digital content. [s. l.]: IEEE, 2010: 235-239.

[14] 僧德文,李仲学,李春民,等. 基于 OpenGL 的真实感图形绘制技术及应用[J]. 计算机应用研究, 2005, 22(3): 173-175.