

三维虚拟机器人运动仿真系统设计*

邓文红¹, 李 龙², 蔡洪斌²

(1. 西南交通大学 智能控制开发中心, 成都 610031; 2. 电子科技大学 计算机科学与工程学院, 成都 611731)

摘要: 通过对三维虚拟机器人运动仿真系统的发展进行介绍和分析, 描述了基于零件拼装的三维虚拟机器人运动仿真的有效方法。针对三维虚拟机器人零件结构特点和拼装功能, 对虚拟机器人零件的图形建模方法、虚拟机器人运动及传感器功能仿真进行了分析设计, 重点分析了运动仿真过程的设计方法。实验结果表明, 系统能够很好地遵循物理特性实现虚拟机器人的运动仿真, 且性能较优。

关键词: 三维虚拟机器人; 运动仿真; 传感器仿真

中图分类号: TP391.9 文献标志码: A 文章编号: 1001-3695(2013)12-3820-04

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2013.12.079

Design and implement of 3D virtual robot kinematics simulation system

DENG Wen-hong¹, LI Long², CAI Hong-bin²

(1. Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. School of Computer Science & Engineering, University of Electronic Science & Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: This paper introduced the development of 3D virtual robot kinematics simulation system. And this paper elaborated an effective method of building 3D virtual robot kinematics simulation system based on a physics engine. According to the characteristic of the virtual robot parts and the functions, it described the robot graphical modeling method, sensor functions and the kinematics simulation procession. The experimental results demonstrate that the kinematics simulation system works well based on the physics rule, and it is better than LEGO software.

Key words: 3D virtual robot; kinematics simulation; sensor simulation

0 引言

智能机器人是一个多种高新技术的集成体, 涉及当今许多前沿领域的科学技术。随着机器人技术的迅速发展, 以机器人为载体的教育平台引起了国内外学术界和教育界的广泛重视^[1]。基于机器人的教育手段能够激发学生对高科技的兴趣, 训练学生的创新性思维, 培养学生的动手实践能力, 尤其是计算机编程能力。

国外智能机器人的研究开展较早。早在 20 世纪六七十年代, 日本、美国、英国等西方发达国家已经相继在本国大学里开展了对机器人教育的研究^[2], 到了七八十年代他们在中小学校也进行了简单的机器人教学, 在此过程中推出了各自的教育机器人基础开发平台。智能机器人主要是应用于机器人竞赛和课堂教学。国内外教育机器人的设计与应用活动丰富多彩, 目前, 全球每年有一百多项机器人竞赛^[3], 参加人员从小学生、中学生、大学生、研究生到研究者。国际上主要的机器人竞赛有国际机器人奥林匹克竞赛、FLL 机器人世锦赛、机器人世界杯足球赛等。每年国内有几十到上百支代表队参加这些国际竞赛活动。

国内外出现不少相关产品, 国外产品如 LEGO 机器人、RB5X、IntelliBrain robot 等; 国内有博思威龙教育机器人、能力风暴机器人、中鸣机器人、Sunny618 机器人、通用 ROBOT 教学机器人等。LEGO“课堂机器人”是一种优秀的科技教育产品。

这一独创性的教育工具是由美国麻省理工大学、美国 TUFTS 大学、乐高公司和美国国家仪器公司共同开发研制的^[4]。它将模型拼装和计算机编程有效地结合在一起, 使孩子们能够设计自己的机器人, 在计算机上编写程序, 然后通过与计算机相连的红外发射器将程序下载到机器人的大脑——RCX 微型电脑中, 从而控制机器人的运动。

1 实物机器人及教育机器人虚拟平台

1.1 实物机器人介绍

本文设计与实现的三维虚拟机器人运动仿真系统是教育机器人虚拟平台软件的子系统。教育机器人虚拟平台软件以国内某知名品牌的实物机器人为基础, 完全通过计算机模拟机器人的拼装与运动等过程。

该实物机器人的主要结构分为机械系统、传感器、主控制器、动力源及嵌入式软件五大部分。

a) 机械系统。机械构件全部采用积木式, 可循环使用和升级; 在传动方式上包括链条传动、皮带传动、履带传动等各种齿轮传动方式; 驱动装置有减速马达、高速马达和伺服器三种, 配上减速箱, 非常适合于对扭矩和转速有不同要求的传动。

b) 传感器。包括火焰传感器、光敏传感器、超声波传感器、红外避障传感器、巡线传感器等配件, 适合于国内各种机器人的比赛活动和创意教育。

c) 主控制器。由输入部分、控制部分和输出部分组成, 它

收稿日期: 2013-01-17; 修回日期: 2013-03-16 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61175055)

作者简介: 邓文红(1969-), 男, 四川成都人, 博士研究生, 主要研究方向为智能信息处理(sooiet@163.com); 李龙(1988-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为计算机应用技术; 蔡洪斌(1966-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为计算机图形学。

是机器人的大脑,共有 22 个接口,其中有 8 个马达接口、13 个传感器接口和 1 个下载接口,还可 DIY 12 个传感器接口。

d) 动力源。机器人采用两种供电方式,一种是碱性电池供电,另一种是充电电池供电。

e) 编程软件。采用图形化与 C 语言两种编程方式,适合于不同计算机水平的青少年。

实施机器人的实物零配件包括方条、扁条、齿轮、车轮;连接件有轴和螺丝;电机马达有高速马达、调速马达以及多种传感器(包括光电、触碰、红外、超声波和数字指南针等传感器)。如图 1 所示。



图1 智能机器人实物零配件

1.2 教育机器人虚拟平台

教育机器人虚拟平台根据实物机器人的拼装与使用方式,在计算机上实现虚拟拼装和仿真等功能,使中小学生在拼装实物机器人之前,可以通过计算机模拟这些过程来验证机器人设计的功能是否可以实现,一旦验证成功,再拼装实物机器人。即使只使用教育机器人虚拟平台,同样可以训练中小学生的设计能力。

教育机器人虚拟平台软件组成主要包括拼装、编程、场景编辑、运动仿真等子系统。拼装子系统以三维图形的方式模拟拼装机器人,是本文研究的运动仿真子系统的基础;编程子系统模拟实物机器人中嵌入式软件的编程,其代码解释将在运动仿真子系统中控制虚拟机器人的仿真运动;场景编辑器系统用于编辑虚拟机器人使用的场景,如巡线机器人竞赛中布置黑线的场地;运动仿真子系统是本文研究的重点,下面将详细阐述。

2 仿真物理原理及实现技术

使用物理仿真技术进行虚拟机器人的仿真,主要是处理具有物理属性的包围盒在各种情况下产生的变化。在仿真中主要有包围盒的建立、碰撞检测、包围盒位置调整等情况。

2.1 仿真动力学原理

机器人仿真动力学主要研究机器人的运动与受力之间的联系。目前主要的动力学算法有牛顿—欧拉动力学、凯恩方法和拉格朗日动力学。

牛顿—欧拉动力学是在对刚体的质心、动量矩定理等经典刚体动力学的基础上,通过对每个刚体建立的动力学方程组建整个系统的动力学方程。计算每个刚体的受力包括有重力、摩擦力、约束力等众多受力。虽然这种方法的物理意义非常明晰,一目了然地表达出了系统的所有受力情况,但是由于其方程数量过大,导致计算效率低下,在实际的仿真中无法满足实时计算的要求。

凯恩方法采用多自由度的系统动力学方程来对动力学进行描述,即采用了广义速率代替广义坐标,引入了偏速度、偏角速度等概念。其研究重点从坐标形变换转变到运动研究,避开了动力学函数的大量繁琐运算,使推导过程更为简便,比较

实用于计算机仿真推导。

拉格朗日(Lagrange)力学方法采用分析力学的方法,把系统看做一个整体,并采用统一的方法进行分析,把物理学中的能量和功作为需要分析的物理量,并以此为依据建立动力学方程。它通过能量和功的物理量能够有效避免方程中出现内力项。采用绝对坐标和运动约束来组建系统的动力学方程,并表示系统关联情况。采用拉格朗日方程能够直接推导出比较系统规范的动力学方程,并且方程的计算集中在微分和代数层面,求解迅速,比较适合计算机运算。

智能机器人在进行仿真过程中,其难点是模拟包含电机马达等动力来源的机器人的动力学模型,以及模拟多种传感器采集与数据处理。电机马达是智能机器人运行的动力源,主要提供一个可设置的角速度参数,并根据角速度带动转轴提供动力维持机器人运动。本系统建立了有源动力学模型及传感器数据仿真,不但使用智能机器人在电机作用下运行真实,并且传感器仿真功能也与实际情况相符。

2.2 OBB 包围盒

在物理仿真中,包围盒采用 OBB(oriented bounding box)层次包围盒树的方式建立,OBB 包围盒更加紧密地逼近物体,更加贴近零件的形状,也会跟随物体的一阶矩任意旋转,同时能比较显著地减少包围体的个数,从而避免了大量包围体之间的相交检测。在建立 OBB 包围盒时,可以利用一次矩阵(均值)和协方差矩阵来计算包围盒的位置和方向。设第 i 个三角形的顶点矢量为 p^i, q^i, r^i ,包围盒包围的三角面片数为 n ,包围盒的中心位置为 $m = \frac{1}{3n} \sum_{i=1}^n (p_i, q_i, r_i)$,也就是定点分布的均值。协方差矩阵 C 每个元素如下:

$$C_{jk} = \frac{1}{3n} \sum_{i=1}^n (\overline{p_j p_{ik}} + \overline{q_j q_{ik}} + \overline{r_j r_{ik}}) \quad 1 \leq j, k \leq 3$$

其中: $\overline{p_i} = p_i - m, \overline{q_i} = q_i - m, \overline{r_i} = r_i - m$ 均为三维向量。然后求出协方差矩阵 C 的特征向量。由于协方差矩阵 C 是一个实对称矩阵,所以以此为依据确定 OBB 包围盒坐标的三个特征向量相互垂直,再将此三个特征向量进行单位化后,即可以使用 OBB 的局部坐标的方向轴。将对象所有的点投影到三个轴向上,计算出各方向轴上的投影区间,即可以确定 OBB 包围盒的大小。

2.3 碰撞检测

在使用 OBB 包围盒的情况下,采用分离轴定理的方法是最为常见的,能够很快地检测出 OBB 之间的相交情况。

首先确定了两个 OBB 包围盒分别的三个分离轴,并通过三个轴向与另三个轴向相互叉乘得到 9 个向量,总共得到 15 个分离轴。将这两个 OBB 分别向这些分离轴上投影,再依次判断两个 OBB 包围盒在各个分离轴上的投影区间是否存在重叠,并以此来判断两个 OBB 包围盒是否存在相交。

在机器人拼装过程中,一旦检测到零件之间发生碰撞检测,将采用零件与包围盒同时向世界坐标系 Y 方向平移一个单位,并再次判断碰撞检测,直到不发生碰撞为止。

2.4 位姿调整

在三维图形空间中,包围盒在绝对坐标系的空间位姿可采用空间变换矩阵 P (也称位姿矩阵)的形式来描述。

$$P = \begin{bmatrix} X_{e1} & X_{e2} & X_{e3} & 0 \\ Y_{e1} & Y_{e2} & Y_{e3} & 0 \\ Z_{e1} & Z_{e2} & Z_{e3} & 0 \\ X_s & Y_s & Z_s & 0 \end{bmatrix}$$

矩阵前三行分别为包围盒局部坐标系中的方向矢量, X_s 、 Y_s 、 Z_s 为坐标原点。当零件的包围盒空间位姿进行相应的调整, 使其满足当前的约束状态, 这个过程其实是一个包围盒坐标旋转和平移的过程, 等价于位姿矩阵 P 发生了一个坐标变换 T_{mov} , 到达新的位姿矩阵 P' , 即 $P' = P \times T_{mov}$, T_{mov} 是一个类似 P 的 4×4 矩阵。

$$T_{mov} = \begin{bmatrix} X_1 & X_2 & X_3 & 0 \\ Y_1 & Y_2 & Y_3 & 0 \\ Z_1 & Z_2 & Z_3 & 0 \\ M_{tx} & M_{ty} & M_{tz} & 1 \end{bmatrix}$$

其中: M_{tx} 、 M_{ty} 、 M_{tz} 分别为零部件沿三个坐标轴的平移分量, 矢量 X 、 Y 、 Z 反映转动因素, 实现包围盒从一种位置到另一种位置的转变。

3 运动仿真系统设计

三维虚拟机器人运动仿真子系统完全仿真实物机器人的运动方式。在进行仿真时, 需要根据机器人的实际形态及预期的运动建立数学模型、几何模型及参数接口, 以便实现实时计算和物理运动仿真。

3.1 三维图形建模

一个机器人是非常复杂的, 它通常由多个零件、传感器、车轮、电机马达等零件拼装组成, 如灭火机器人、投篮机器人等, 机器人可以通过本身安装的传感器对周围环境进行检测, 并将结果反馈给控制模块; 控制模块再根据接收到的传感器数据做出相应的操作, 控制机器人的运动方式。图2所示为灭火机器人模型, 它是由基板、车轮、主控器、电机马达、火焰传感器、风扇等多种零件组合而成。

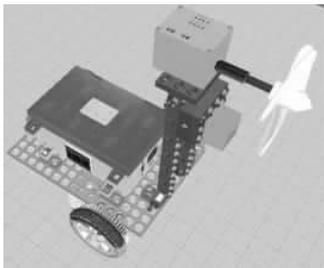


图2 教育机器人虚拟平台拼装的灭火机器人

在灭火机器人中, 每个零件之间由若干个连接件(如轴或螺丝)连接, 导致各个部分的零件之间存在连动关系; 每个零件都是具有一定形状的物体; 在实物机器人中, 设计人员根据需要可编写主控程序, 下载到主控芯片中, 由它控制电机马达转动, 从而带动轴连接的其他组件进行相应的运动。实物机器人的组装与编程控制非常复杂, 而用计算机对智能机器人进行三维图形仿真更是具有挑战性。

3.2 三维图形仿真世界

虚拟机器人运动仿真系统由四个模块组成: 物理引擎、三维显示模块、机器人本体和控制模块, 分别负责机器人的动力学仿真、三维图形绘制与显示、机器人零件连接点定义和分组, 以及控制程序的分析与解释。

ODE 开发模板提供物理引擎(含动力学、碰撞检测和仿真循环)和一个简单封装了 OpenGL 的 3D 显示函数库^[5]。本文的主要工作为构建机器人本体模块, 定义机器人并转换为 ODE 可以理解 and 显示的基本模块, 同时提供一个编程控制模

块, 实现用户与机器人之间的控制处理。ODE 包括刚体动力学模拟引擎和碰撞检测引擎两个组成部分, 在大多数情况下, 能够满足机器人运动仿真的需要。

本文使用 Body、Geom 和 Joint 三种基本元素来描述刚体, 分别表示刚体本体、几何形状和刚体之间的连接关系。Body 表示具体多种物理属性的刚体, 其中变化的属性有刚体重心位置、速度、四元数、方向; 不变的属性有质量、重心^[6]。在刚体局部坐标中的相对位置以及转动惯量矩阵, 一组 Body 构成一个刚体世界(world)。Geom 表示刚体的几何形状, 同时也是碰撞检测中的基本元素。ODE 支持球、圆柱、平面以及由三角形网格描述的复杂形状等^[7]。一组 Geom 构成一个空间, 将若干简单的 Geom 以一定的相对位置关系拼装起来, 就可以构建出机器人的复杂组合 Body。Joint 表示两个刚体构成的关节, 也就是刚体之间的约束关系, 在机器人中采用轴和螺丝来表述, 轴表示为两个刚体之间可以随连接点转动, 螺丝表示为两个刚体为刚性连接, 同时进行转动。一组 Joint 形成一个 Joint 群。

运动仿真的基本流程如图3所示。在进入运动仿真系统后, 首先对仿真世界、机器人零件、包围盒等信息进行初始化操作, 随后进入仿真循环, 根据主控器控制信息调整机器人包围盒位置, 设置节点参数, 进行碰撞检测后给出相应的物理碰撞反应, 最后更新显示图像。若结束仿真, 则将仿真世界与空间中的零件、包围盒等信息销毁。

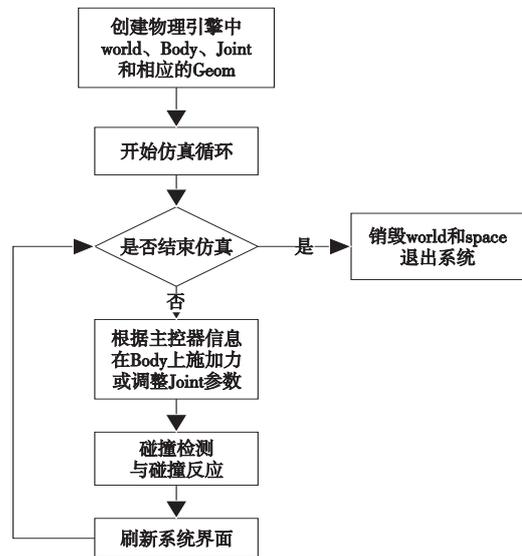


图3 系统仿真流程

本文按照零件特征将机器人整体划分为多个部分, 将有镶嵌部分的零件和用连接件连接的零件归并为同一组件中。机器人的建立过程算法如下:

```
//在一个组内查找每一个零件
for baseElement in group {
    //初始化零件物理属性、重心, 并更新组件重心
    initialization();
}
//查找分组
for group in scene {
    //更新轴与螺丝连接点 Joint 信息,
    //对有硬性相连的组件进行合并
    //更新组件信息
    group.update();
}
//在场景中查找动力源、设置动力轴、从动轴, 并进行匹配操作
for motor in scene {
```

```

    motor.update();
}
//场景零件
for sceneElement in scene {
    //初始化地板和场景零件的物理属性和包围盒信息
    initialization();
}
//更新照相机信息
updateCamera();

```

3.3 仿真运动控制方式

在虚拟机器人运动仿真过程中,通过不断地读取控制信息来更新机器人各个组件所受到的力与方向,决定机器人整体移动速度和方向^[8]。主要循环如下:a)依据控制命令,设置电机马达的速度;b)传感器仿真,对射线空间和全局空间进行一次碰撞检测,记录下所有的射线与其他物体的碰撞点,并计算碰撞点与机器人的距离,若小于检测距离,则加入射线碰撞点集合。碰撞检测以后,计算碰撞点集合的碰撞点个数,如果碰撞点个数为零,则表示没有检测到障碍物;否则表示检测到障碍物,从而调整运动方式^[9]。

3.4 传感器仿真

为了使虚拟机器人能够智能地调整工作状态,就必须为其配备各种传感器。机器人的传感器大致可以分为两类,一类是内部信息传感器,主要用于采集机器人内部各个部分的运行状态,如前行速度、加速度、各个部分所处的位置等;另一类是外部信息传感器,如红外线传感器、声音传感器、光敏传感器、火焰传感器、碰撞传感器等。这些传感器是机器人用于感觉外部世界的器官,可以使机器人敏锐地感知到周围环境。

在虚拟机器人仿真系统中,根据传感器的物理特性和数据采集的工作原理,实现了对多种传感器的仿真。典型的传感器仿真包括:a)距离传感器,它是利用超声波和红外线测量前方障碍物距离的方法,采用射线算法进行仿真测距;b)巡线传感器,它可以保证机器人沿着特定的线路前进,采用获取地板纹理 RGBA 值的方式来获得当前地板上的纹理值,从而实现虚拟机器人巡线前进;c)碰撞传感器,特别是在机器人走迷宫中应用较多。安装了碰撞传感器的机器人在进行仿真时,每帧进行碰撞检测,并对碰撞点信息进行分析,结合当前机器人运行速度计算出碰撞后的受力情况和方向,从而控制虚拟机器人的运动。

4 仿真实验

在仿真实验中,采用的计算机硬件配置如下:CPU 为酷睿双核 T5250(1.55 GHz),显卡为 NVIDIA GT 8600。

图 4 演示了巡线机器人沿黑线运动情况,(a)~(d)表示巡线机器人运动到不同位置时的截图。巡线机器人可以沿图中的黑色曲线前进,为提高难度,曲线上增加了干扰短横线和断切的曲线。巡线机器人通过传感器读取地面纹理信息,通过判断和分析后,控制机器人左右微调,保证机器人始终不受干扰地沿着地板黑线前进。

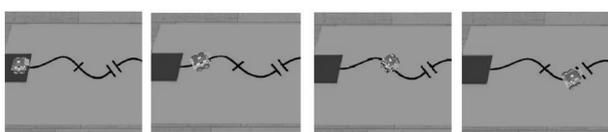
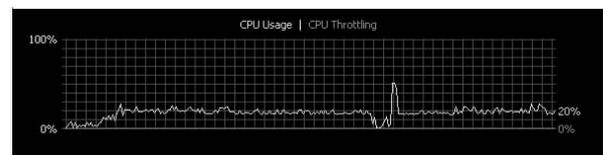


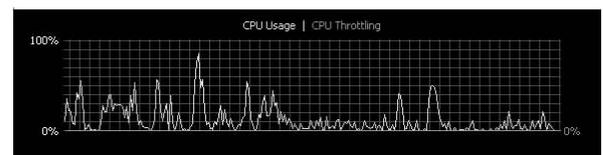
图4 巡线机器人的仿真

虚拟机器人运动仿真子系统的性能测试是:运行总时间为 85 754 ms,总帧数为 2 090 帧,其中,最大帧率为 44 帧,最小帧率为 12 帧,平均运行帧数保持在 25 帧左右。因此,本子系统的主流配置的台式机和笔记本电脑上均能够流畅运行。

教育机器人虚拟平台与 LEGO 软件的性能对比如图 5 所示。教育机器人虚拟平台 CPU 使用率一直在 20%~30% 之间,LEGO 软件 CPU 使用率波动比较大,在 0%~90% 之间波动。可见,教育机器人虚拟平台在 CPU 使用率上优于 LEGO 软件。



(a) 教育机器人虚拟平台的CPU使用率



(b) LEGO 的CPU使用率

图5 CPU使用率对比图

5 结束语

本文主要工作是为三维虚拟机器人设计和实现了运动仿真子系统,它能够根据真实世界的物理规律仿真机器人的运动,并仿真了多种传感器采集数据,使用机器人在环境中的仿真运动真实可信。目前运动仿真子系统已集成到智能机器人虚拟平台中,并交付给用户使用,在运动仿真的真实感及运行速度等方面都得到了好评。

参考文献:

- [1] 王吉岱,李维赞,孙爱芹.教育机器人的研制与发展综述[J].现代制造技术与装备,2007,177(2):10-13.
- [2] CRUZ-MARTIN A, FERNANDEZ-MADRIGAL J A, GALINDO C, et al. A LEGO mindstorms NXT approach for teaching at data acquisition, control systems engineering and real-time systems undergraduate courses[J]. Computers & Education, 2012, 59(3):974-988.
- [3] 方波,曹其新. IDC ROBOCON 比赛与机器人教育的探讨[J]. 现代教育技术,2011,21(3):140-144.
- [4] WANG Wei-zhuang, YAN Yun, WEI Min. Innovative control education using a low cost intelligent robot platform[J]. Robotica, 2003, 21(3):283-288.
- [5] 宋洪军,马昕.基于 OpenGL 的教育机器人软件系统设计与实现[J]. 计算机应用研究,2008,25(2):616-618.
- [6] 李清玲,李爽.基于 OpenGL 的三维人体运动仿真[J]. 计算机仿真,2011,28(4):270-274.
- [7] 薛方正,刘成军.基于 ODE 引擎的开放式仿人机器人仿真[J]. 机器人,2011,33(1):84-90.
- [8] NIDAL F, VICENTE M. Dynamic simulation of a parallel robot: coulomb friction and stick-slip in robot joints[J]. Robotica, 2010, 28(1):35-45.
- [9] GAO Hai-tao, ZHANG Zhi-sheng, CAO Jie, et al. General dynamic model for educational assembling-type robot and its fast simulation algorithm[J]. Journal of Southeast University: English Edition, 2009, 25(3):340-346.