

文章编号: 1006-2467(2007)08-1287-05

基于 Java 3D 的仿人型机器人三维仿真

孙毅军, 余蕾斌, 邱长伍, 曹其新

(上海交通大学 机器人研究所, 上海 200240)

摘要: 针对 Java 3D 中虚拟机器人的树状结构特点, 提出一种由机器人运动学导出的矩阵变换方法, 使机器人左、右脚均可动态地成为树状结构的“根结点”。根据该方法编写的虚拟机器人驱动程序, 并采用单线程机制, 可以驱动虚拟机器人各关节平滑运动。最后, 在仿人型机器人的图形化编程仿真平台上实现了虚拟机器人的行走动作。

关键词: 仿人型机器人; 三维仿真; 运动学; Java 3D

中图分类号: TP 391.9 **文献标识码:** A

Tri-Dimensional Simulation of Humanoid Robot Based on Java 3D Technology

SUN Yi-jun, YU Lei-bin, QIU Chang-wu, CAO Qi-xin

(Research Inst. of Robotics, Shanghai Jiaotong Univ., Shanghai 200240, China)

Abstract: A method of matrix transformation derived from robot kinematics was provided according to the characteristic of virtual robot's tree structure in Java 3D. And it makes both left foot and right foot of the virtual robot be the "root" node of tree structure in turn dynamically. Based on the method, a virtual robot's drive was developed in single thread, making the virtual robot move smoothly. At last, the walking motion was realized on a graphic programming and simulation platform that supports the humanoid robot.

Key words: humanoid robot; 3D simulation; kinematics; Java 3D

机器人仿真是机器人研究中的一项重要内容, 在机器人示教编程、轨迹规划、碰撞检测等方面都有着广泛的应用^[1,2]。目前, 机器人的三维仿真都是基于 VC 和 OpenGL, 或者基于 Java 3D 和 VRML 实现。Java 3D 的数据结构采用场景图(Scene graphic structure), 是一些具有方向性的不对称图形组成的树状结构^[3]。依此数据结构建立的虚拟机器人模型具有一个固定的根结点, 非常适合具有固定基座的工业机器人仿真, 只要采用适当的方法控制各个关节坐标系的位姿即可实现三维图形的仿真运动。但对于仿人型机器人, 却无固定的基座可言或者说基

座处于运动状态。因此, 这种具有固定根结点的虚拟机器人模型难以仿真仿人型机器人。

据此, 本文提出一种由机器人运动学导出的矩阵变换方法, 使虚拟机器人的根结点可以动态地改变, 并根据该方法编写出虚拟机器人驱动程序, 在由 Java 和 VRML 开发的仿人型机器人图形化编程仿真软件上成功地实现了机器人的行走动作。

1 机器人图形化编程仿真平台

1.1 图形化编程简介

图形化编程主要用来实现与用户之间的人机交

收稿日期: 2006-07-10

作者简介: 孙毅军(1979-), 男, 辽宁沈阳人, 博士生, 主要从事机器人运动学仿真方面的研究。

曹其新(联系人), 男, 教授, 博士生导师, 电话(Tel.) 021-62932750; E-mail: qxcao@sjtu.edu.cn.

互,并提供图形化的编程方法,以提高机器人的编程效率.用户通过鼠标调整好虚拟机器人各个关节的角度后,软件会截取并按一定比例压缩三维仿真窗口图像以记录该位姿,这样的一系列以图像表示的机器人位姿记录形成机器人的基本动作程序——Motion程序.每个Motion程序最多拥有30个机器人位姿记录.最多允许20个Motion程序连接起来,演示出复杂的机器人动作.Motion程序编辑完成后,可以在虚拟机器人上仿真.软件通过串行接口与真实机器人连接,能够上传和下载Motion程序等数据,也能够控制真实机器人演示Motion程序.软件的框架结构如图1所示.

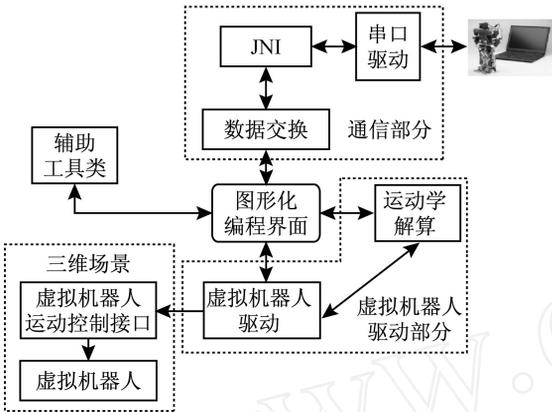


图1 软件的框架结构

Fig.1 Framework of the software

1.2 虚拟机器人建模

本文讨论的仿人型机器人具有17个自由度,每条腿5个自由度,每条胳膊3个自由度,头部1个自由度.图2所示为机器人仿真的场景简图.

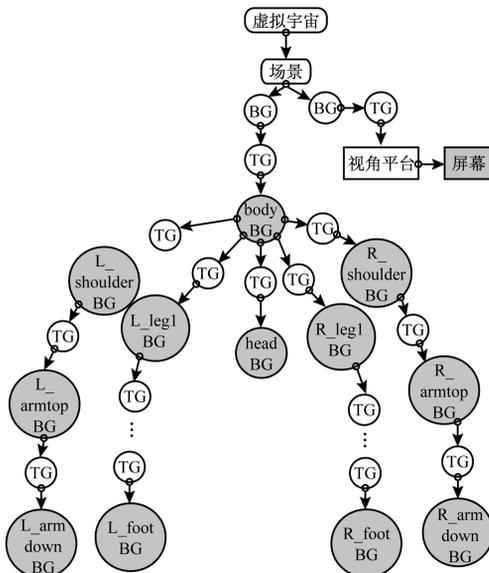


图2 机器人仿真的场景简图

Fig.2 Scene graphic structure of robot simulation

图2中: TG代表 TransformGroup 结点; BG表示 BranchGroup 结点. BG结点是子图形或下面的分支组的根结点, TG结点用来设定三维形体的位置信息,建立在 BG结点上.由图2可见,以机器人的躯干(body)作为虚拟机器人的根结点,头部和四肢均作为其下一级的分支.

机器人的运动学模型如图3所示.

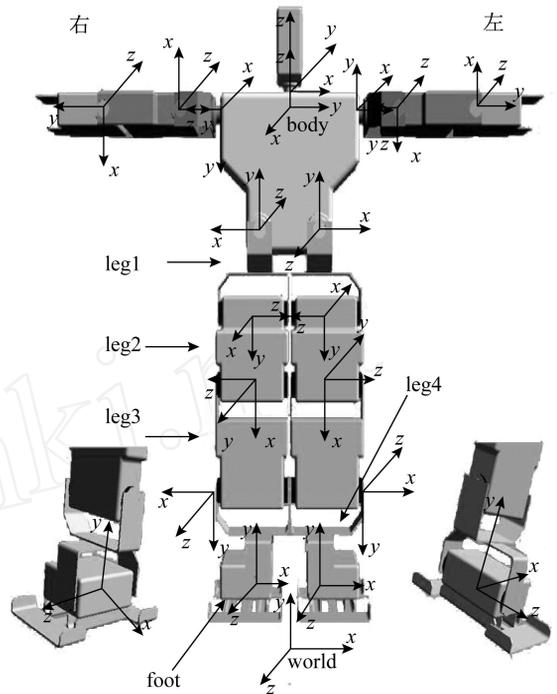


图3 机器人的运动学模型

Fig.3 Kinematic model of robot

图中:采用常规的坐标变换法和D-H规则;机器人显示的初始位姿,各个关节角度均为0;Java 3D的世界坐标系是一个符合右手螺旋法则的三维坐标系,正x轴向右,正y轴向上,正z轴朝外.根结点“body”的坐标系相对于世界坐标系可以有任意的位姿^[4],即

$${}^{world}T_{body} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & l_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & l_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & l_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

左腿关节的坐标系之间的变换矩阵为:

$${}^{body}T_{leg1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0.281 \\ \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 & 0 & 0.240 \\ \sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 & -0.696 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} \text{leg}^1 T_{\text{leg}^2} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 0.060 \\ -\sin 2 & -\cos 2 & 0 & -0.480 \\ -\cos 2 & \sin 2 & 0 & -0.261 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ \text{leg}^2 T_{\text{leg}^3} &= \begin{bmatrix} \sin 3 & \cos 3 & 0 & -0.200 \\ \cos 3 & -\sin 3 & 0 & 0.410 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ \text{leg}^3 T_{\text{leg}^4} &= \begin{bmatrix} 0 & \cos 4 & -\sin 4 & 0.615 \\ 0 & \sin 4 & \cos 4 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0.292 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ \text{leg}^4 T_{\text{foot}} &= \begin{bmatrix} \cos 5 & -\sin 5 & 0 & -0.351 \\ -\sin 5 & -\cos 5 & 0 & 0.480 \\ 0 & 0 & -1 & -0.031 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

右腿关节的坐标系之间的变换矩阵为:

$$\begin{aligned} \text{body} T_{\text{leg}^1} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0.281 \\ \cos 6 & -\sin 6 & 0 & -0.240 \\ \sin 6 & \cos 6 & 0 & -0.696 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ \text{leg}^1 T_{\text{leg}^2} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & -0.060 \\ -\sin 7 & -\cos 7 & 0 & -0.480 \\ -\cos 7 & -\sin 7 & 0 & -0.261 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ \text{leg}^2 T_{\text{leg}^3} &= \begin{bmatrix} \sin 8 & \cos 8 & 0 & 0.200 \\ \cos 8 & -\sin 8 & 0 & 0.410 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ \text{leg}^3 T_{\text{leg}^4} &= \begin{bmatrix} 0 & \cos 9 & -\sin 9 & 0.615 \\ 0 & \sin 9 & \cos 9 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0.292 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ \text{leg}^4 T_{\text{foot}} &= \begin{bmatrix} -\cos 10 & \sin 10 & 0 & -0.351 \\ -\sin 10 & -\cos 10 & 0 & 0.480 \\ 0 & 0 & 1 & 0.031 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

则在任意时刻,机器人脚部(左、右)相对世界坐标系的位姿为

$$\text{world} T_{\text{foot}} = \text{world} T_{\text{body}} \text{body} T_{\text{leg}^1} \text{leg}^1 T_{\text{leg}^2} \times \text{leg}^2 T_{\text{leg}^3} \text{leg}^3 T_{\text{leg}^4} \text{leg}^4 T_{\text{foot}} \quad (1)$$

2 仿真中机器人行走动作的实现

仿真中,机器人的行走可以通过不断轮流地将

两只脚视为“基座”来实现,即要求机器人的两只脚轮流充当根结点,各子结点都相对于父结点运动.但是,因为机器人的三维模型以机器人躯干“body”为根结点,当生成机器人模型后,无法动态地改变其根结点,所以需要利用运动学求解根结点的变换矩阵,使机器人当前的支撑脚变为“根结点”.

2.1 根结点的矩阵变换

图 4 所示当机器人左脚为支撑脚时,关节 Left leg 3 转动 角后,根结点“body”相对于世界坐标系的变换情况.根据图 3 中的机器人运动学模型,腿部的 5 个关节从上至下依次记为 leg1、leg2、leg3、leg4、foot.

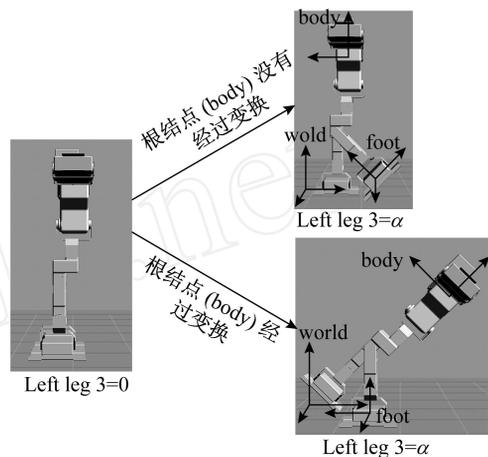


图 4 关节 Left leg 3 转动 角时,根结点的变换情况
Fig. 4 Body's transform as joint Left leg 3 rotates angle

若使左脚变为“根结点”,即要求 $\text{world} T_{\text{foot}}$ 在机器人其他关节运动过程中不变,则通过变换根结点的位姿矩阵实现.在根结点矩阵变换之前,先要记下此时的支撑脚相对于世界坐标系的位姿 $\text{world} T_{\text{foot}}$;然后算出 Left leg 3 转动后相对于 Left leg 2 的齐次变换矩阵 $\text{leg}^2 T_{\text{leg}^3} = \text{leg}^2 T_{\text{leg}^3}|_3$;以 $\text{leg}^2 T_{\text{leg}^3}$ 更新式(1)中的 $\text{leg}^2 T_{\text{leg}^3}$,因为其中 $\text{body} T_{\text{leg}^1}$ 、 $\text{leg}^1 T_{\text{leg}^2}$ 、 $\text{leg}^3 T_{\text{leg}^4}$ 、 $\text{leg}^4 T_{\text{foot}}$ 都没有改变,所以要保持 $\text{world} T_{\text{foot}}$ 不变,只有更新 $\text{world} T_{\text{body}}$.更新后的 $\text{world} T_{\text{body}}$ 为

$$\text{world} T_{\text{body}} = \text{world} T_{\text{foot}} (\text{leg}^4 T_{\text{foot}})^{-1} (\text{leg}^3 T_{\text{leg}^4})^{-1} \times (\text{leg}^2 T_{\text{leg}^3})^{-1} (\text{leg}^1 T_{\text{leg}^2})^{-1} (\text{body} T_{\text{leg}^1})^{-1} \quad (2)$$

将变换矩阵 $\text{world} T_{\text{body}}$ 应用于根结点“body”的坐标系,将 $\text{body} T_{\text{leg}^1}$ 、 $\text{leg}^1 T_{\text{leg}^2}$ 、 $\text{leg}^2 T_{\text{leg}^3}$ 、 $\text{leg}^3 T_{\text{leg}^4}$ 、 $\text{leg}^4 T_{\text{foot}}$ 分别应用于左腿的对应关节坐标系,即可实现机器人以左脚为“基座”运动.同理,亦可实现机器人以右脚为“基座”运动.同时,根据式(1),在机器人运动时不断地检测机器人脚部坐标系的位置,要求及时地判断支撑点.如果检测到脚部支撑点与地面发生碰撞,那么机器人立即切换以此脚为“基座”运动,以实现机

机器人的行走.

2.2 虚拟机器人驱动

使机器人各关节从起点位姿同时运动到终点位姿,可以采用多线程的方法.对于自由度比较少的机器人,多线程机制可以实现机器人各关节同时运动,并提高 CPU 的使用效率.但仿人型机器人自由度数目很多,采用多线程机制将会使 CPU 负荷过重,并且难以保证各个关节运动的协调性.因此,在虚拟机器人驱动中采取单线程机制.为了使机器人各关节同时协调运动,本文采用线性插值的方法,在机器人相邻位姿区间插入 n 个过渡的位姿.这样,虽然机器人从当前位姿运动到下一个位姿的过程仍然是各个关节的顺序运动,但由于插值次数足够多,在三维图形的显示效果上,机器人各关节都在同时运动.

虚拟机器人驱动部分由类 SimuDrive 和类 Calculate_BodyTransform 组成.其工作原理如图 5 所示.类 Calculate_BodyTransform 封装了上述的根结点“body”相对于世界坐标系的变换矩阵^{world} T_{body}的求解方法,并将机器人所有关节的角度制数据换算成弧度制.

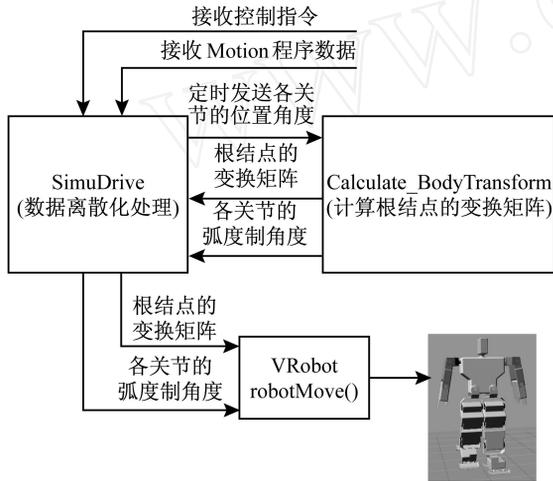


图 5 虚拟机器人驱动原理

Fig.5 Theory of the virtual robot's drive

当运行 Motion 程序时,通过调用 SimuDrive 的 setData() 方法,类 SimuDrive 的实例获得 Motion 程序的相关数据,之后,类 SimuDrive 的定时器 timer 实例被触发,每隔一定时间调用一次类 Calculate_BodyTransform 的实例,计算机器人各关节位姿(包括根结点“body”的位姿)并调用虚拟机器人类 VRobot 的行为控制接口 robotMove(),刷新虚拟机器人的位姿.

在 Motion 程序中,每个机器人位姿记录都包含有速度参数(1~8 档).有两种方式可以实现速度

的改变:保持定时器 timer 每次调用类 Calculate_BodyTransform 的实例的延迟时间不变,改变相邻机器人位姿间的线性插值点,速度档位越高,插值点越少;保持相邻机器人位姿间的插值点不变,改变定时器 timer 的延迟时间,速度档位越低,延迟时间越长.

经过实验,采用第一种方法,当机器人运行于较高的速度档位时,由于插值点的减少,造成脚部支撑点与地面的碰撞检测误差变大,作业时可能造成两个脚底板同时陷入地板以下,给支撑脚部支撑点的判断带来很大的麻烦;采用第二种方法,可以根据脚部与地面的碰撞检测允许误差的平均值设置插值点的个数,能够保证脚部与地面的碰撞检测误差控制在允许范围内,但由于每次插值运算量很大,需要耗时 30 ms 左右,因此定时器 timer 的最短延迟时间应大于 30 ms,具体数据则按频率响应时间确定.

3 三维仿真实验

图 6 所示是根据上述行走机理编写的行走动作程序的行走姿态.

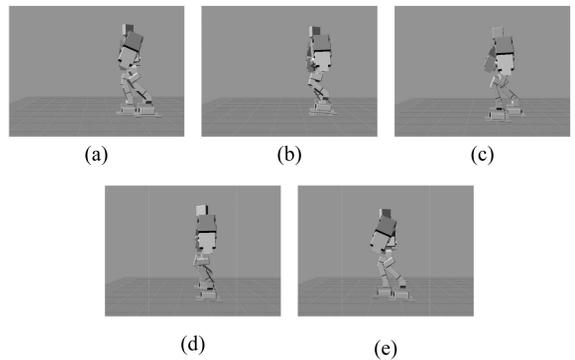


图 6 行走动作的仿真

Fig.6 The simulation of walking motion

在 Java 3D 中,可以利用类 Transform 3D 提供的方法实现矩阵运算.实验结果表明,运用上述机器人运动学模型,可以准确地计算出根结点“body”的变换矩阵.虚拟机器人驱动采用第二种插值方式时,能够较准确地检测出脚部支撑点与地面的碰撞,使机器人的左、右脚轮流成为“基座”.由于每次插值的计算量比较大,对虚拟机器人的响应速度造成一定影响.仿真运行的计算机环境:CPU 采用 intel 的 P4 2.0, RAM 为 512 MB,显卡为 NVIDIA 的 4 倍速 GeForce FX5200, 128 MB 显存;操作系统为 Windows XP.经过测试,当设置机器人从位姿 i 运动到位姿 $i + 1$ 的速度选择 1 档(最快)时,虚拟机器人执行时间为 1 s 左右.

4 结 语

本文提出的利用机器人运动学导出的矩阵变换方法能够在虚拟机器人的运动过程中动态地改变虚拟机器人的“根结点”,为树状结构的虚拟机器人的行走提供了理论依据.仿真实验表明,采用单线程机制开发的虚拟机器人驱动,可以驱动虚拟机器人平滑的运动,并能够较真实地仿真出机器人的行走动作.相对于多线程机制而言,具有 CPU 资源占用率少,各个关节运动协调性好的优点.但是在虚拟机器人的执行速度上,目前还无法取得令人满意的效果,需要做进一步的研究.这在以后的研究工作中,将加入机器人的动力学和控制部分的仿真,直接计算出机器人运动过程中虚拟机器人的身体相对于世界坐标系的各个离散时刻的位姿矩阵 ${}^{\text{world}}T_{\text{body}}$,使虚拟机器人仿真出更复杂的动作.

参考文献:

- [1] Kanehiro F, Fujiwara K, Kajita S, *et al.* Open architecture humanoid robotics platform[C]// **IEEE Conference on Robotics and Automation**. Washington, DC: ICRA, 2002: 24 - 30.
- [2] Okada K, Ogura T, Haneda A, *et al.* Autonomous 3D walking system for a humanoid robot based on visual step recognition and 3D foot step planner[C]// **IEEE Conference on Robotics and Automation**. Barcelona, Spain: ICRA, 2005: 623 - 628.
- [3] Sowizral H A, Deering M F. The Java 3D API and virtual reality[J]. **Computer Graphics and Applications**, 1999, 19(3): 12 - 15.
- [4] 杨东超,刘莉,徐凯,等.拟人机器人运动学分析[J].**机械工程学报**, 2003, 39(9): 70 - 74.
YANG Dong-chao, LIU Li, XU Kai, *et al.* Kinematics analysis of humanoid robot[J]. **Chinese Journal of Mechanical Engineering**, 2003, 39(9): 70 - 74.

(上接第 1286 页)

参考文献:

- [1] Matsumoto O, Kajita S, Komoriya K. Flexible locomotion control of a self-contained biped leg-wheeled system[C]// **Proceedings of 2002 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems**. Lausanne, Switzerland: IEEE Press, 2002: 2599 - 2604.
- [2] Hashimoto K, Hosobata T, Sugahara Y, *et al.* Realization by biped leg-wheeled robot of biped walking and wheel-driven locomotion [C]// **Proc ICRA**. Barcelona, Spain: IEEE Press, 2005: 2970 - 2975.
- [3] Endo G, Hirose S. Study on roller-walker: Multi-mode steering control and self-contained locomotion [C]// **Proc ICRA**. San Francisco: IEEE Press, 2000: 2808 - 2814.
- [4] Chitta S, Heger F, Kumar V. Design, analysis, simulation and experimental results for a rollerblader robot [C]// **Proc ICRA**. New Orleans, LA: IEEE Press, 2004: 3944 - 3949.
- [5] 宋立博. 从动轮式溜冰机器人运动学与动力学研究[D]. 上海: 上海交通大学机械与动力工程学院, 2002.
- [6] 韦见凡. 跟专家练轮滑[M]. 北京: 北京体育大学出版社, 2003.
- [7] 陈文良, 洪嘉振, 周鉴如. 分析动力学[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1990.
- [8] 徐子力, 吕恬生, 徐振华, 等. 双足溜冰机器人运动原理与运动学分析[J]. **中国机械工程**, 2006, 17(3): 230 - 233.
XU Zi-li, LÜ Tian-sheng, XU Zhen-hua, *et al.* Principle of biped ice-skater robot and its kinematic analysis [J]. **China Mechanical Engineering**, 2006, 17(3): 230 - 233.

上海交通大学学报

国家期刊奖百种重点期刊

中国高校精品科技期刊

欢迎投稿

欢迎订阅