

基于虚拟现实的双臂机器人运动仿真系统研究

董 浩¹, 盖 帅², 高 湛¹

(1. 河北省自动化研究所 河北石家庄 050081; 2. 燕山大学电气工程学院 河北秦皇岛 066004)

摘 要: 随着机器人行业的快速发展, 仿人形双臂机器人得到越来越多的应用。根据 Baxter 双臂机器人的结构, 采用 D-H 方法建立机器人模型, 并推导冗余双臂机器人正运动学, 并建立逆运动学方程, 导入机器人模型到 Unity3D 中, 设置相应的关节约束。通过在 Linux 系统中创建 Baxter 机器人控制服务器, Unity3D 与之形成双向通信实现双臂机器人的运动仿真。实验结果表明, 通过在 PC 机上操作方便用户对机器人进行运动仿真和轨迹规划, 控制仿真方案良好且可视性强。

关键词: Baxter 双臂机器人 运动方程 Unity3D 运动仿真

中图分类号: TP391.9

文献标志码: A

文章编号: 1006-8945(2017)12-0051-04

DOI:10.14099/j.cnki.tjkj.2017.12.016

Motion Simulation System of Dual-arm Robot Based on Virtual Reality

DONG Hao¹, GAI Shuai², GAO Zhan¹

(1. Hebei Institute of Automation, Shijiazhuang 050081, Hebei Province, China;

2. Electrical Engineering Institute of Yanshan University, Qinhuangdao 066004, Hebei Province, China)

Abstract: With the rapid development of the robot industry, imitation humanoid arms are receiving more and more attentions. According to the structure of the Baxter dual-arm robot, a robot model was established by DH method, and the forward kinematics and inverse kinematics equations of the redundant dual-arm robot were deduced. The robot model was introduced into Unity3D, and the corresponding joint constraint was set up. Simulation of robot motion was based on two-way communication between Unity3D and Baxter robot control server. The experimental results show that the motion simulation and trajectory planning of the robot were carried out by PC user, the simulation scheme is good and the visibility is strong.

Key words: Baxter dual-arm robot; equation of motion; Unity3D; motion simulation

0 引 言

仿人形双臂机器人作为当前机器人技术研究的热点问题, 因其具有高智能性、高灵活性等优点, 拥有广阔的发展前景^[1-2]。近年来双臂机器人日益受到重视, 如 PR2、Baxter 等仿人形双臂机器人不断涌现, 并广泛应用于工业、军事、服务等诸多领域^[3]。人们希望通过它们灵巧的双臂代替人工完成各种复杂的操作任务, 且不会增加人类的编程负担^[4]。由于双臂机器人的复杂性, 有必要先在虚拟环境中模拟机器人手臂运动, 验证算法的正确性。针对 Baxter 双臂机

器人, 对其进行运动学求解与工作空间分析, 并进行轨迹规划, 在 Unity3D 中进行运动仿真验证, 通过以太网与 ROS 通信把数据传输给实际的机器人完成控制, 既可以在虚拟环境中进行算法验证, 又可以实时监控实际机器人, 具有很强的可视性。

1 双臂机器人运动仿真系统

本文采用 Unity3D 平台进行双臂机器人的运动仿真研究, 主要通过导入三维模型, 添加相应关节约束^[5], 编写算法库和建立 Windows 与 Linux 通讯实现

基金项目: 河北省高层次人才资助项目: 基于虚拟现实智能工厂仿真系统(A2016002032); 河北省科学院两院合作项目: 基于虚拟现实的智能工厂仿真系统(171404)。

收稿日期: 2017-11-10

运动仿真,并设计方便美观的人机交互界面。

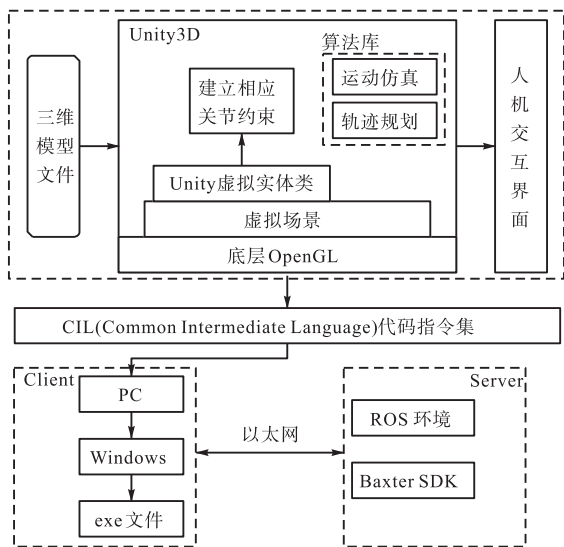


图 1 双臂机器人运动仿真系统框架

Fig.1 Framework of robot motion simulation system

如图 1 所示,把 FBX 格式的 Baxter 机器人模型导入到 Unity3D 中建立每个关节之间的约束,添加关节运动属性^[6]。通过算法库可实现双臂机器人的运动仿真和轨迹规划,其中运动仿真主要是运动学正逆解。在 Linux 系统下建立 Baxter 机器人的 TCP Server 用于实现机器人的实时控制与反馈,Windows 系统中建立 TCP Client 与 Linux 系统进行以太网通讯,最后可实现虚拟机器人控制实际机器人并实时反馈实际机器人的状态。

2 双臂机器人运动学模型

2.1 双臂机器人结构

本文研究的平台是 Baxter 仿人形冗余双臂机器人。Baxter 机器人是在 2012 年 9 月由 Rethink Robotics 公司研发的一款工业机器人。它由 7 个自由度的柔性双臂、LCD 显示屏的头部、动画式的面部、两个自由度的颈部关节、集成一体化的相机、声纳以及关节角度传感器和可移动平台等组成^[7],如图 2 所示。Baxter 机器人采用独立的直流电机驱动机械臂的每个关节,前 4 个自由度用于调整手臂末端位置和关节轨迹的优化,后 3 个自由度主要用于末端姿态的调整。

2.2 双臂机器人运动模型

Baxter 双臂机器人每个臂都是冗余七自由度机械臂,本文使用 MATLAB 机器人工具箱建立 Baxter 机器人双臂模型,如图 3 所示。虽然其能够反应机器

人相应结构,但是和实际还是有一些差距,所以运用 unity3D 软件导入已建立好的机器人模型来仿真实际机器人。

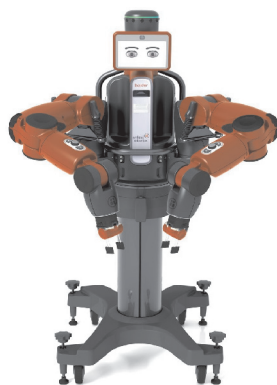


图 2 Baxter 机器人

Fig.2 Baxter robot

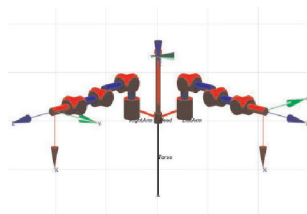


图 3 机器人 MATLAB 模型

Fig.3 Robot MATLAB model

由图 3 可以看出, Baxter 机器人双臂都有 7 个自由度,其中包括 3 个自由度的肩关节,2 个自由度的

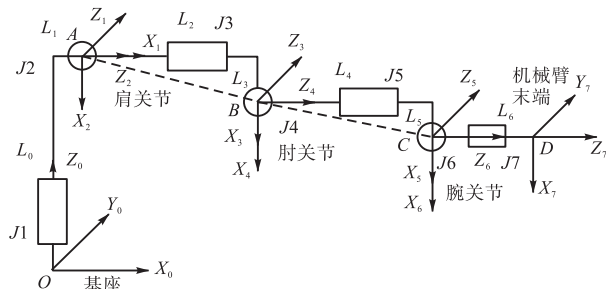


图 4 Baxter 机器人左臂 D-H 坐标系

Fig.4 Baxter robot left arm D-H coordinate system

表 1 Baxter 机器人左臂的 D-H 参数

Tab.1 The D-H parameters of the left arm of the Baxter robot

i	θ_i	$d_i(m)$	$a_{i-1}(m)$	α_{i-1}	θ_i 范围
1	θ_1	0.27	0.069	-90	(-97.5, 97.5)
2	θ_2	0	0	90	(-123, 60)
3	θ_3	0.364	0.069	-90	(-175, 175)
4	θ_4	0	0	90	(-2.86, 150)
5	θ_5	0.375	0.01	-90	(-175.3, 175.3)
6	θ_6	0	0	90	(-90, 120)
7	θ_7	0.23	0	0	(-175.3, 175.3)

肘关节和 2 个自由度的腕关节,因为机器人双臂是对称的关系,本文只对其左臂进行分析,根据机械臂的各部位尺寸参数,建立机器人左臂的 D-H 模型,如图 4 所示。其中 O 为基座坐标系原点, A 为肩关节, B 为肘关节, C 为腕关节, D 为执行器末端坐标系原点。D-H 参数如表 1 所示。

3 双臂机器人运动学

3.1 正运动学

对于具有若干自由度的串联机器人,可以由各关节角度确定机器人末端姿态,正运动学就是已知各关节角度,求出末端姿态的过程。根据文献[8]可知,机器人连杆 $\{i\}$ 坐标系相对于 $\{i-1\}$ 的变换矩阵为:

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & a_{i-1} \\ \sin \theta_i \cos \alpha_{i-1} & \cos \theta_i \sin \alpha_{i-1} & -\sin \alpha_{i-1} & -\sin \alpha_{i-1} d_i \\ \sin \theta_i \sin \alpha_{i-1} & \cos \theta_i \cos \alpha_{i-1} & \cos \alpha_{i-1} & \cos \alpha_{i-1} d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

将表 1 的 D-H 参数代入可得 Baxter 左臂的各变换矩阵如下:

$$\begin{aligned} {}^0T_1 &= \begin{bmatrix} c_1 & -s_1 & 0 & 0.069 \\ 0 & -c_1 & 1 & 0.27 \\ -s_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ {}^1T_2 &= \begin{bmatrix} c_2 & -s_2 & 0 & 0 \\ 0 & c_2 & -1 & 0 \\ s_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ {}^2T_3 &= \begin{bmatrix} c_3 & -s_3 & 0 & 0.069 \\ 0 & -c_3 & 1 & 0.364 \\ -s_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ {}^3T_4 &= \begin{bmatrix} c_4 & -s_4 & 0 & 0 \\ 0 & c_4 & -1 & 0 \\ s_4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ {}^4T_5 &= \begin{bmatrix} c_5 & -s_5 & 0 & 0.01 \\ 0 & -c_5 & 1 & 0.375 \\ -s_5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ {}^5T_6 &= \begin{bmatrix} c_6 & -s_6 & 0 & 0 \\ 0 & c_6 & -1 & 0 \\ s_6 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$${}^6T_7 = \begin{bmatrix} c_7 & -s_7 & 0 & 0 \\ s_7 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_7 & 1 & 0.23 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

式中, c_i 代表 $\cos \theta_i$, s_i 代表 $\sin \theta_i$, 则该机器人左臂的正运动学方程可表示为:

$${}^0T = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4 {}^4T_5 {}^5T_6 {}^6T_7 = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & p_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

式中, p_x 、 p_y 、 p_z 分别为机器人末端相对于基坐标 x、y、z 的位移。第 1、2、3 列分别为机器人末端中心相对于基坐标系 x、y、z 轴的方向余弦^[9]。

3.2 逆运动学

在实际应用中,一般要知道从工作空间到关节空间的映射关系,也就是运动学逆解。本文研究机器人逆运动学主要从速度层面出发,因为速度层面是求解线性方程组,因而运算速度快。

工作空间和关节空间的映射关系可运用雅可比矩阵表示为:

$$\begin{cases} \dot{p} = J_r(q)\dot{q} \\ \omega = J_o(q)\dot{q} \end{cases} \quad (1)$$

式中, $J_r(q)$ 、 $J_o(q)$ 分别表示位置和姿态的雅可比矩阵; \dot{p} 、 ω 分别表示机械臂末端线速度和角速度。

根据式(1),逆运动学的数值解可用前一时刻的雅可比矩阵求出:

$$q(t_{k+1}) = q(t_k) + J^{-1}(q(t_k))\dot{x}(t_k)\Delta t \quad (2)$$

上式中的雅可比矩阵不是用连续的积分求出,而是使用前一时刻的雅可比矩阵,因而实际求解出来的关节角会出现一定的跳动,使得求出的机械臂末端位姿会有一定的偏差。通过解得反馈可有效地消除上述偏差,假设偏差为:

$$e = x_d - x = x_d - k(q) \quad (3)$$

式中, x_d ——为期望末端位姿; x ——为关节角度计算的位姿,用欧拉角表示其中姿态; $k(q)$ ——为正运动学求解位姿映射关系。

将式(3)左右两端对时间求导有:

$$\dot{e} = \dot{x}_d - \dot{x} = \dot{x}_d - J_A(q)\dot{q} \quad (4)$$

式中, $J_A(q)$ ——为解析雅可比矩阵,它与几何雅可比矩阵 J 的关系如下:

$$J = T_A(\phi)J_A(q) \quad (5)$$

式中, $T_A(\phi)$ ——为几何雅可比矩阵和解析雅可比矩阵的变换矩阵:

$$T_A(\phi) = \begin{bmatrix} 1 & O \\ O & T(\phi) \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$T(\phi) = \begin{bmatrix} 0 & -s_\phi & c_\phi s_\theta \\ 0 & c_\phi & s_\phi s_\theta \\ 1 & 0 & c_\theta \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中, ϕ 、 θ 、 φ 分别为机械臂末端相对于基坐标系的欧拉角。

4 系统仿真实验

为验证双臂机器人仿真系统是否可行, 本文在 PC 机上使用 Unity3D 软件开发了仿真系统使用界面, 所开发的应用程序具有测试需要的一些基本功能, 如图 6 所示。

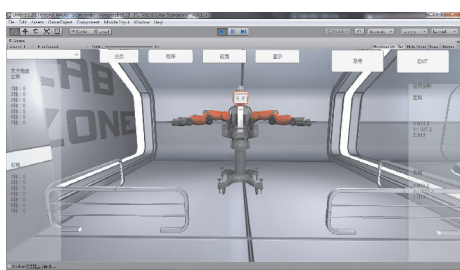


图 5 Baxter 机器人交互界面

Fig.5 Baxter robot interaction interface

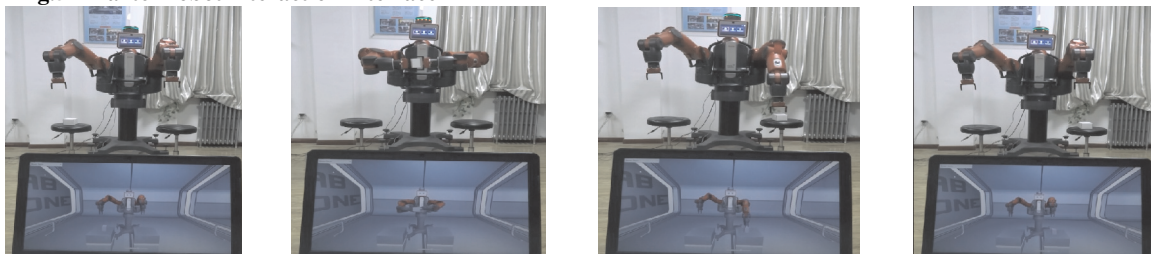


图 6 实体机器人运行

Fig.6 Real robot runs

5 结 语

通过仿真实验, 证明了运动仿真系统可以实现仿真功能, 使用户可以先在虚拟环境中熟悉机器人, 一定程度避免了因编程失误而发生危险的损害。此外, 仿真试验中观察到软件运行正常, 而且实际机器人也可以很好地完成动作, 证明了本文中运动学算法的正确性。■

参考文献

- [1] 邢登鹏, 苏剑波. 仿人机器人双臂/躯干运动规划研究[J]. 中国科学, 2010, 40(9): 1233-1231.
- [2] 王丽慧, 周华. 仿生机器人的研究现状及其展方

实验过程与目的: 先在装有 Windows 系统的 PC 机上运行应用程序, 设置 TCP 参数, 通过编写程序观察 Baxter 机器人模型运动过程, 动作无误后, 在装有 Linux 系统的计算机中运行 Baxter 控制服务器, 使得 Windows 系统与 Linux 系统进行通讯, 让实际机器人与模型一起动作, 对比运动是否一致。

步骤 1: 点击设置, 修改客户端的 TCP 参数, 因为整个运动过程需要用到两个电动夹手, 所以在工具坐标系设置 Z 方向增加 75 mm。

步骤 2: 编写机器人运动程序, 本实验模拟机器人双臂配合拾取一个盒子, 通过找出一些关键点运用插补算法与轨迹规划算法实现整个过程。

步骤 3: 使机器人双臂回到关节都为零的位置准备, 然后运行程序使机器人模型动作, 为方便截图在程序中加入了一定的延时。整个运行过程没有出现错误, 并且在 Unity3D 中可以很好地观察机器人的运动。

步骤 4: 与实际的 Baxter 机器人连接通讯, 测试是否可以正常运动。运行过程和模拟的机器人运动一样, 证明该软件具有一定的运动规划和运动仿真功能, 如图 6 所示。

向[J]. 上海师范大学学报: 自然科学版, 2007, 12(6): 37-42.

- [3] Cotton S, Vanoncini M, Fraisse P, et al. Estimation of the centre of mass from motion capture and force plate recordings: A study on the elderly [J]. *Applied Bionics & Biomechanics*, 2011, 8(1): 67-84.
- [4] 唐涛宇. 机器人离线编程系统的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [5] Unity Technologies. Unity4. X 从入门到精通[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2013.
- [6] 张占龙, 罗辞勇, 何为. 虚拟现实技术概述[J]. 计算机仿真, 2005(3): 1-3, 7.

下转第 57 页

用橡胶密封圈与桩腿结构隔离。

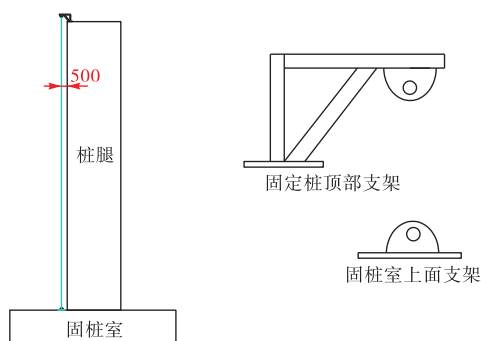


图 4 海洋石油 161 外加电流阴极保护阴极电缆安装图

Fig.4 Cable laying and support for impressed current cathodic protection of offshore oil platform 161

在固定桩顶部和固桩室上面用槽钢焊接两个钢丝绳支架,从固定桩顶部到固桩室上面安装一根不锈钢钢丝绳,利用拆卸方便的花篮螺丝拉紧钢丝绳,阴极电缆用专用非金属卡环固定在钢丝绳上。在阴极和参比电极电缆中间安装可拔插的航空水密插头。电缆应留有适当余量,方便桩腿提升,在桩腿进行提升前将插头拔出,整理好电缆并保护好插头部分,待平台桩腿放下固定后,将插头连接好,多余电缆盘起并进行捆扎。

5 恒电位仪设置

钢铁腐蚀过程类似原电池反应过程:

阳极反应(Fe): $\text{Fe(s)} = \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$

阴极反应(FeC_3): $\text{O}_2(\text{g}) + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- = 4\text{OH}^-$

Fe(OH)_2 进一步被空气中的 O_2 氧化成 Fe(OH)_3 , 部分脱水后变成 Fe_2O_3 (铁锈)。

电位-pH 图是依据热力学数据作出的图线,对金属的防护有一定的参考价值,见图 5。

依次将恒电位仪加载到额定输出电流的 40%、60%、80%、100%,记录恒电位仪输出电流、输出电压以及参比电极电位。若桩腿保护电位达到 0 ~ 0.25 V (相对于锌参比电极) 范围,则保持现有电流输出,将控制方式改为恒电位控制。

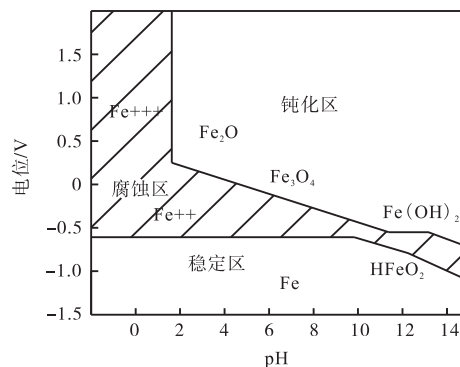


图 5 钢铁电位-pH 值图

Fig.5 Iron potential-pH

如果在使用过程中参比电极失效,应将恒电位仪调整为手动模式,并采用便携式银/氯化银参比电极测量桩腿电位,作为恒电位仪输出电流调整依据。若桩腿保护电位达到 -0.8 ~ -1.05 V (相对于便携式银/氯化银参比电极),则保持现有电流输出。

6 结 语

防止或减缓海洋石油平台的腐蚀是一个重要的研究课题,根据国内外研究现状,阴极保护技术已被证实是针对钢铁腐蚀较为有效的一种防护技术。该项技术最关键的一点是外加电流密度和保护电位参数的确定。目前工程上应用的多是经验值,我们需要对其做出进一步的探索。另外,防护系统的监控还比较落后,智能的监测控制设备需要研制。■

参考文献

- [1] 李妍, 刘忠斌. 海洋平台的阴极保护[J]. 中国造船, 2002(43): 162-164
- [2] 张波, 邓永生. 某油库管道外加电流阴极保护系统故障分析[J]. 石油化工腐蚀与防护, 2011(5): 39-41
- [3] 王淑颖. 强制电流阴极保护实时腐蚀防护的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2011.
- [4] 侯宝荣. 海洋腐蚀与防护[M]. 北京: 科学出版社, 1997.

上接第 54 页

- [7] 樊帅权, 周波, 孟正大, 等. 三维可视化的喷涂机器人离线轨迹规划系统[J]. 计算机技术与发展, 2012, 22(9): 13-17.
- [8] 丁楠. 多机械臂系统协调控制研究[D]. 上海: 上海交

通大学, 2012: 1-2.

- [9] 孙祥溪, 罗庆生, 苏晓东. 工业码垛机器人运动学仿真[J]. 计算机仿真, 2013(3): 303-306, 371.