

[自控·检测]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2018.06.009

基于 ROS 平台的机械臂精确控制研究

王 好, 范平清, 王岩松, 李 聪

(上海工程技术大学 机械与汽车工程学院, 上海 201620)

摘 要:针对传统机器人虚拟控制与仿真平台在进行机器人运动控制时控制系统设计工作量大、可移植性差和开发难度高等问题,提出了一种基于开源软件平台(robot operating system,ROS)机械臂运动控制的方法。以六自由度机械臂为研究对象,首先基于 ROS 平台搭建机械臂控制架构,其次利用 RRTconnect(连接性快速拓展随机树)算法对机械臂运动轨迹进行规划,随后分别采用 PID 控制器和计算力矩控制器控制机械臂沿着规划轨迹运动,最后利用 MATLAB 软件对机械臂运动过程中各关节的位置、速度等信息进行分析,比较 2 种控制器控制效果。仿真结果表明利用非线性的计算力矩控制器能够得到比较小的轨迹跟踪误差且控制速度更快。研究表明在 ROS 平台下,非线性控制器性能更优越。

关 键 词:机械臂;开源软件平台;RRTconnect 算法;运动规划;PID 控制;计算力矩控制

中图分类号:TP241

文献标志码:A

文章编号:1005-2895(2018)06-0042-06

Research on Precise Control of Robot Arm Based on ROS Platform

WANG Hao, FAN Pingqing, WANG Yansong, LI Cong

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University Engineering of Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: In order to solve the problems of large workload, poor portability and high difficulty in the development of the traditional robot virtual control and simulation platform for robot motion control, a kind of manipulator motion control method based on an open source software platform (robot operating system, ROS) was put forward. In this paper, the manipulator with six degrees of freedom was taken as the research object. Firstly, the robot control architecture based on ROS platform was built. Secondly, based on the RRTconnect algorithm, the motion planning of the manipulator was carried out. Then the PID controller and the computed torque controller were used to control the manipulator motion along the planning trajectory respectively. Finally, the MATLAB software was used to analyze the position, speed and other information of each joint during the movement of the manipulator to compare the control effect of the two controllers. The simulation results show that the nonlinear computed torque controller can obtain relatively small trajectory tracking error and the control speed is faster. It indicates that under the ROS platform, the nonlinear controller has better performance.

Keywords: robot arm; ROS (robot operating system); RRTconnect algorithm; motion planning; PID controller; computed torque controller

机械臂的精确控制问题一直是控制领域的前沿热门问题。从控制工程的角度来看,机械臂是被广泛研究的具有非线性模型的物理系统。然而现有基于 ROS(机器人操作系统)机械臂控制器的相关研究绝大多数是线性的 PID 控制器^[1-2],这类控制器在低速情况下能满足精度要求,但是对于高速运动的机械手,往往无法达到满意的控制效果。针对这种情况,国内外学

者提出了多种非线性控制系统^[3]。如文献[4]利用标称的计算力矩控制器对微创手术机器人进行控制,提高其轨迹跟踪精度。文献[5-6]利用标称计算力矩控制器与模糊控制相结合的策略对不确定性机械臂进行轨迹跟踪控制。文献[7-8]在机器人的关节系统中引入计算力矩法与神经网络相结合的控制,以达到补偿机器人的不确定动力学特性所带来的运动误差的目

收稿日期:2018-05-31;修回日期:2018-08-29

基金项目:国家青年自然科学基金(51505275);国家自然科学基金(51675324)。

第一作者简介:王好(1993),男,山东宿州人,硕士,主要研究方向为机械臂运动规划与控制。通信作者:范平清(1980),女,山东泰安人,副教授,硕士生导师,主要研究方向为机械系统动力学和智能控制。E-mail:1186835162@qq.com

的。然而它们大多是基于 MATLAB 进行控制器的编写和仿真验证,而 MATLAB 本质是一款数学计算软件,能够利用其强大的算法来完成仿真实验,但对 3D 模型的表现力较差,且很难与外部系统和其他功能需求相结合。基于此,课题组以 UR5 机械臂为研究对象,在 ROS 框架下,对机械臂进行运动规划,利用计算力矩控制器对机械臂进行控制,并与 PID 控制器控制效果进行比较,进而更好地了解 ROS 在低层控制器的能力和限制,也为其它控制器在 ROS 中应用提供参考。

1 机器人操作系统

ROS 是基于 UNIX 环境下的一种开源的用于机器人的后操作系统,包含底层驱动程序管理、硬件抽象描述、共用功能的执行、程序间的消息传递及程序发行包管理等。它也提供一些工具程序和库,用于获取、建立、编写和运行多机整合的程序。

1.1 ROS 中仿真模型的建立

机器人操作系统 ROS 不仅可以与真实机器人进行通信,还可以在机器人的仿真模型上进行相应的操作。在 ROS 中所能识别机器人模型文件为标准化机器人描述格式 (URDF),该文件是一种用于描述机器

人的结构、关节及自由度等的 XML 格式文件,它为机器人提供结构参数、运动学链等物理响应。建立 URDF 文件,需要利用 SolidWorks 实现机械臂的三维建模,随后通过 SW2urdf 插件对机械臂的各个关节和连接进行设置,最后导出 URDF 文件。

1.2 ROS 控制架构

机器人机械系统的正常运行离不开精确可靠的控制系统,基于 ROS 平台的机械臂控制系统架构如图 1 所示。架构主要分为 5 个部分:用户层、路径规划层、运动控制层、被控对象机械臂以及关节状态反馈。

用户层主要功能为基于机器人模型进行任务规划,也就是设置机械臂运动的目标位置等。路径规划阶段,主要任务是针对用户层所设置的机械臂运动的目标位置进行运动规划,规划出一条到达目标位置的运动轨迹。作为控制框架的核心,运动控制阶段的任务是对规划轨迹进行运算,驱动机械臂,使其沿着预定的轨迹运动。关节状态观测器能检测机器人关节的实时状态,并同时与上层规划进行通信,使整个系统不仅能实时接受上位机的管理控制,还能在突发情况下进行紧急处理。

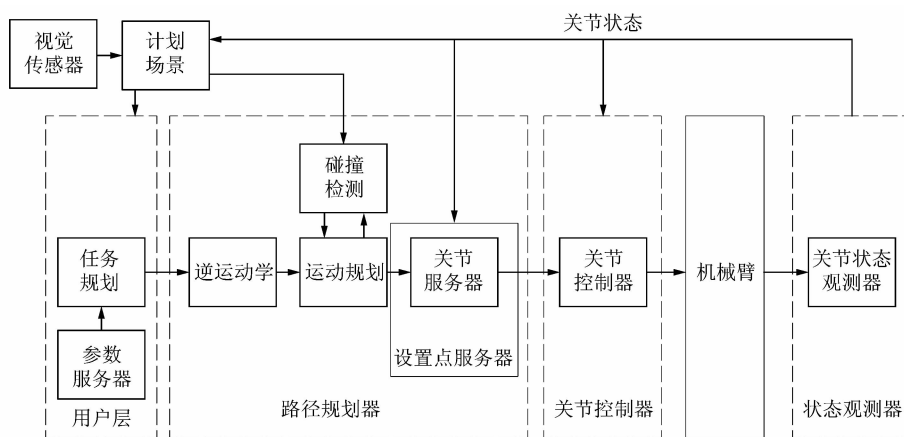


图 1 机器人控制架构

Figure 1 Robot control architecture

2 机器人运动学求解

2.1 机械臂正运动学

以丹麦 Universal Robots 公司生产的 UR5 机器人为研究对象,该机器人具有 6 个旋转关节,根据 D-H 参数法建立的 UR5 机器人的坐标系如图 2 所示。

建立坐标系后,依照相邻坐标系之间的约束关系确定 D-H 参数,D-H 参数法又称四参数法,其通过相邻连杆坐标系间的连杆扭转角 α_i 、连杆长度 a_i 、连杆偏移量 d_i 和关节角 θ_i 等描述和建立连杆坐标系间的齐次变换关系。UR5 机器人的 D-H 参数如表 1 所示。

表 1 机械臂 D-H 参数

Table 1 Parameters of D-H of manipulator

关节序号 i	α_i/rad	a_i/mm	d_i/mm	θ_i/rad	
				初始角	变化范围
1	$\pi/2$	0	89.1	0	$\pm 2\pi$
2	0	-425	0.0	0	$\pm 2\pi$
3	0	-392	0.0	0	$\pm 2\pi$
4	$\pi/2$	0	109.1	0	$\pm 2\pi$
5	$\pi/2$	0	94.6	0	$\pm 2\pi$
6	0	0	82.3	0	$\pm 2\pi$

里设计一个 PD 控制。先引入控制:

$$\tau = D_n(q) \cdot u + H_n(q, \dot{q}) + G_n(q). \quad (13)$$

由公式(3)与公式(4),机械臂动力学方程可变换为:

$$D(q) \cdot \ddot{q} + H(q, \dot{q}) + G(q) = \tau = D_n(q) \cdot u + H_n(q, \dot{q}) + G_n(q). \quad (14)$$

因为 $D(q)$ 是一个可逆矩阵,可以得到:

$$\ddot{q} = u. \quad (15)$$

所以公式(15)可以等价为解耦的线性定常系统,在控制系统中,位置信号可以通过系统反馈得到,速度信号可以通过一次微分得到,但是两次微分存在的偏差就会被放大,当已知期望轨 $q_r(t)$,那么 $\dot{q}_r(t)$ 与 $\ddot{q}_r(t)$ 也就可以得到,所以可以在 $\ddot{q}_r(t)$ 这一问题上引入 PD 控制,表示如下:

$$\ddot{q} = \ddot{q}_r + K_d(\dot{q}_r - \dot{q}) + K_p(q_r - q). \quad (16)$$

式中: K_p 为比例增益矩阵, K_d 为微分增益矩阵,且均为正定矩阵; q_r , $\dot{q}_r$ 和 $\ddot{q}_r$ 分别为各关节期望位置,速度与加速度。

对公示(16)化简,得到系统闭环特性误差方程:

$$\ddot{e} + K_d \cdot \dot{e} + K_p \cdot e = 0. \quad (17)$$

其中, $e = q_r - q$, $\dot{e} = \dot{q}_r - \dot{q}$,由 PD 控制器的稳定性可知,闭环系统的误差可以收敛到 0。

将公式(15)~(16)代入公式(13)中,得到机械臂的系统输入:

$$\tau = D_n(q) \cdot [\ddot{q}_r + K_d(\dot{q}_r - \dot{q}) + K_p(q_r - q)] + H_n(q, \dot{q}) + G_n(q). \quad (18)$$

式中: $D_n(q)$ 为标称惯性矩阵; $H_n(q, \dot{q})$ 为标称的哥氏力和离心力矢量; $G_n(q)$ 为标称的重力矢量。

机器人的运动学和动力学模型所需的计算可以通过使用 OROCOS 运动学和动力学库^[9]来实现。同样通过使用 ChainIdSolver_RNE 类可以实现牛顿-欧拉算法。

4 仿真与结果分析

4.1 机械臂运动规划

机械臂的运动规划,主要是通过 ROS 中的 MoveIt! 模块实现的,在规划之前对机械臂各关节初始位置和目标位置的取值如表 2 所示。

通过利用 RRTconnect 规划算法^[10]完成了 UR5 机械臂的轨迹规划,其规划的轨迹如图 4 所示。而在机械臂进行轨迹规划时,往往需要得到在关节空间中解算的一系列关节角度插值,因此如果轨迹规划是在笛卡尔空间下进行的,则需要通过机器人逆运动学计算将其转化为在关节空间下的表示,基于此,在 ROS 中

利用数值迭代算法完成了机械臂逆运动学求解,实现工作空间的转化。而且利用 RRTconnect 算法所得的轨迹也能够很好地避开障碍物和自身干涉等碰撞状态。

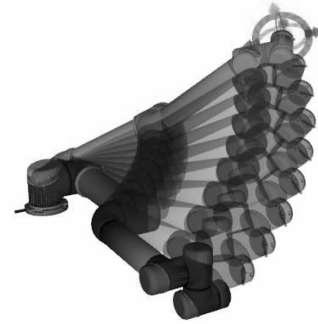
表 2 各关节的关节角度

Table 2 Joint angles of each joint

关节序号 i	初始位置/rad	目标位置/rad
1	0	-0.150 0
2	0	-0.500 0
3	0	0.785 0
4	0	-1.150 0
5	0	-0.392 5
6	0	0.000 0



(a) 初始状态



(b) 运动轨迹

图 4 UR5 机械臂轨迹规划

Figure 4 Trajectory planning of UR5 manipulator

4.2 运动控制

运动规划所得到的机械臂轨迹相关信息被传递给 ROS 底层关节控制器。ROS 控制器根据这些信息完成插值运算,控制机械臂沿着预定的轨迹运动,而 ROS 控制器对 Gazebo 中的机械臂模型的控制是通过 gazebo_ros_control 插件实现的。

由于 ROS 中底层关节控制器本质上是一种插件,因此在 ROS 中关于控制器的更换具有较强的灵活性,通过选择不同控制器对机器人实现控制,比较不同控制器之间的控制效果,能更好地了解 ROS 在底层控制器的能力和限制。

4.3 实验结果分析

在控制 UR5 运动的过程中,通过 joint_states 节点可以实时得到机械臂运动过程各关节位置、速度等信息,将这些信息保存到文本,利用 MATLAB 进行分析,得到 UR5 机械臂各关节的运动关系。

图 5 为关节 1 在 UR5 机械臂进行运动规划时的理论关节角和在 2 种不同控制器下的实际关节角。由曲线可知两控制方案均能控制机械臂沿着预定的轨迹进行运动,但均存在一定的误差,为了比较二者的控制效果,对误差进行分析。

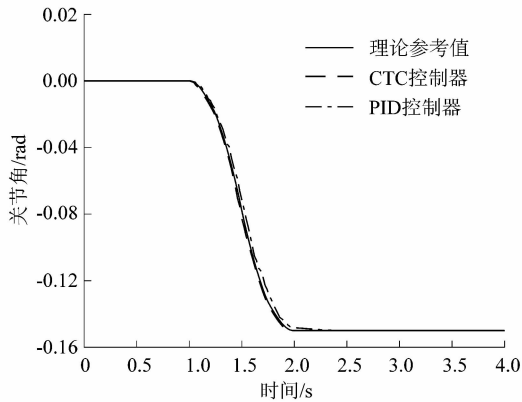


图 5 关节 1 在 3 种情况下的关节角
Figure 5 Angle of joint 1 in three cases

图 6 为关节 1 在 2 种方案下的关节角误差。由图 6 可知计算力矩控制器 (calculation torque controller, CTC) 的轨迹跟踪误差相对于 PID 控制器来说有明显地减少,在 CTC 控制下关节 1 的最大关节角误差 $e_1 = 1.81\text{E} - 3 \text{ rad}$,而 PID 控制下的最大关节角误差 $e_2 = 3.348\text{E} - 3 \text{ rad}$,计算可知 CTC 控制的最大关节角误差减小了 45.9%。

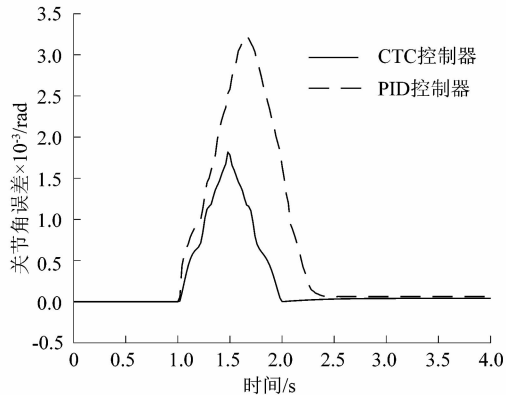


图 6 关节 1 在 2 种方案下的关节角误差
Figure 6 Joint angle errors of joint 1 under two control schemes

同理对关节 2~5 在 2 种控制方案下的关节角误差进行分析,结果如图 7 所示。从图 7 可见,当机械臂在沿着预先规划的轨迹运动时,CTC 的控制效果相对于 PID 控制器,误差更小。当机械臂运动趋近于目标位置时,关节角误差如表 3 所示,可知在 CTC 控制下的机械臂各关节角误差相对于 PID 有明显的减少,其中关节 2 的关节角误差减小幅度最大,减小了 95.1%,关节 4 减小幅度最小,但也减小了 24.5%。

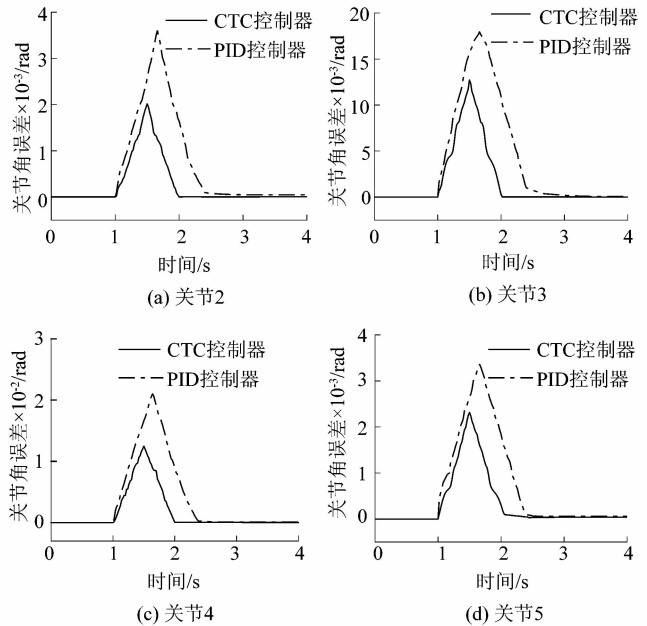


图 7 各关节在 2 种方案下的关节角误差
Figure 7 Joint angle errors of each joint under two schemes

表 3 目标位置时机械臂关节误差

Table 3 Manipulator joint errors at target position

关节序号 i	关节误差 $\times 10^{-5}/\text{rad}$		误差减小幅度/%
	CTC 控制器	PID 控制器	
1	4.239 7	6.249 8	47.4
2	2.384 2	4.651 6	95.1
3	2.833 7	4.787 3	68.9
4	5.044 5	6.279 9	24.5
5	5.994 8	8.852 8	47.6
6	0.000 0	0.000 0	0.0

机械臂在 2 种控制方案下角速度如图 8 所示。

5 结论

以 UR5 机械臂为研究对象,在 ROS 平台下实现了机械臂由运动规划到控制的全过程,最后提取机械臂运动过程中相关的参数数据并对其进行分析,得到如下结论:

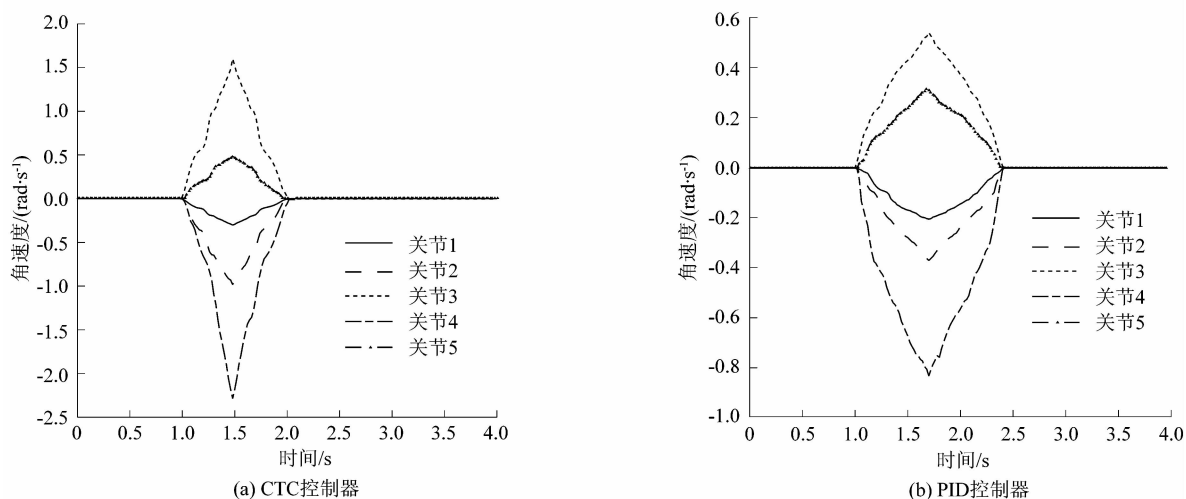


图 8 机械臂在 2 种控制方案下的关节角速度

Figure 8 Joint velocities of manipulator under two control schemes

1) 轨迹跟踪误差。在 ROS 平台下,非线性计算力矩控制器不仅具有较好的控制效果,而且相对于其缺省线性 PID 控制器而言,其轨迹跟踪误差更小,性能更优异。

2) 控制速度。CTC 控制下机械臂关节 4 的速度最大,其最大速度达到 -2.30 rad/s ; 关节 1 的速度最小,其最大速度为 -0.30 rad/s 。而在 PID 控制器控制下的关节 4 的最大速度为 -0.83 rad/s , 关节 1 的最大速度为 -0.21 rad/s , 可见 CTC 控制器控制速度更快。

3) 非线性计算力矩控制器的实现表明 ROS 能够兼容较为先进的控制器,也为其它更先进的控制器的实现提供了一个很好的参考。

参考文献:

- [1] JOSEPH L. Mastering ROS for robotics programming [M]. Birmingham: Packt Publish Ltd., 2015: 134–140.
- [2] MARTINEZ A, FERNANDEZ E, MAHTANI A, et al. Learning ROS for robotics programming [M]. Birmingham: Packt Publishing Ltd., 2013: 264–296.
- [3] 史先鹏, 刘士荣. 机械臂轨迹跟踪控制研究进展 [J]. 控制工程,

2011, 18(1): 116–122.

- [4] 刁燕, 陈章平, 罗华, 等. 基于计算力矩的微创手术机器人控制 [J]. 控制工程, 2011, 18(5): 780–782.
- [5] 杜慧秋. 基于模糊自适应不确定性机械臂的轨迹跟踪控制 [J]. 电机与控制学报, 2005, 9(3): 238–242.
- [6] CHEN Yuan, MA Guangying, LIN Shuxia, et al. Adaptive fuzzy computed-torque control for robot manipulator with uncertain dynamics [J]. International journal of advanced robotic systems, 2012, 9(6): 267–270.
- [7] 贺红林, 何文丛, 刘文光, 等. 神经网络与计算力矩复合的机器人运动轨迹跟踪控制 [J]. 农业机械学报, 2013, 44(5): 270–275.
- [8] 张瑞芬. 受到外部扰动的空间机械臂基于模糊递归神经网络的控制策略 [J]. 机电工程, 2017, 34(1): 62–67.
- [9] BRUYNINCKX H. Open robot control software: the OROCOS project [C]// IEEE International Conference on Robotics and Automation. Seoul, Korea: IEEE, 2001: 2523–2528.
- [10] KUFFNER J J, LAVALLE S M. RRT-connect: an efficient approach to single-query path planning [C]// IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway. San Francisco, CA, USA: IEEE, 2000: 995–1001.

[信息·简讯]

· 行业简讯 · EV CHINA2019 上海国际节能与新能源汽车产业博览会

EVChina 是国内最早专注于新能源汽车产业的展会, 享有节能与新能源汽车第一展, 全球节能与新能源汽车产业风向标的美誉。EVChina2019 上海国际节能与新能源汽车产业博览会将于 2019 年 7 月 3–5 日在上海新国际博览中心隆重举行。本届展会延续“绿色智能 驱动未来”为主题, 展出总面积超 $40\,000 \text{ m}^2$, 展示的产品主要涉及节能与新能源汽车整车、三电(电池、电机和电控)、充电设施、关键零部件及材料等领域, 通过“新能源整车展区(乘用车、物流车和客车)”“电池电机电控展区(核心三电)”“氢能燃料电池展区”“充电设施与配套展区”“线束与连接器展区”和“新能源汽车空调展区”6 大展区, 全面展示节能与新能源汽车发展的最新成果, 这也将是我国新能源汽车行业的一次盛宴。

(汪 洋)