

于神经
得到
用离线
型,从
入,仿
模型,
消除舵

ation
Guid-
Exhib-

发展

北京航

长

函数

流[J].

loop-
ance,
hibit.

工业

基于逆动力学方法的关节型机器人轨迹控制

陈培华^a 曹其新^{a,b}

(上海交通大学 a 机器人研究所; b 机械系统与振动国家重点实验室, 上海 200240)

摘要 在已知机器人关节空间中起点和终点时刻运动参数的情况下,研究了基于五次多项式插值拟合的关节型机器人轨迹规划算法,获取了机器人运动中各个时刻所对应的关节位置、速度和加速度等数据信息。分析了基于迭代牛顿-欧拉算法的机器人逆动力学方程,依据规划好的机器人轨迹求取用于控制机器人运动或进行动力学仿真所需的驱动力矩,并建立了基于逆动力学方程的机器人轨迹控制系统。最后,比较了三种关节型机器人的轨迹控制方法并进行了相应的动力学仿真,对轨迹跟踪误差和力矩大小等性能参数进行比较,证明了基于 RNEC 和加速度反馈的机器人轨迹控制系统具有较高的跟随精度、较明显的轨迹控制效果,是一种较优的力矩控制方法。

关键词 关节型机器人; 逆动力学; 动力学仿真; 轨迹规划; 轨迹控制; 关节空间

中图分类号 TP242 文献标志码 A 文章编号 1671-4512(2013)S1-0017-04

Trajectory control of the articulated robot based on inverse dynamics

Chen Peihua^a Cao Qixin^{a,b}

(a Research Institute of Robotics; b The State Key Laboratory of Mechanical System
and Vibration, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract The trajectory planning algorithm of the articulated robot based on quintic polynomials in the joint space was studied under the condition of starting point's and ending point's motion parameters known, and the corresponding joint positions, speeds and accelerations at every moment were obtained. Research was also carried out on the robot inverse dynamics based on the iterative Newton-Euler algorithm, and the driven torques for robot control or dynamics simulation were calculated according to the planned robot trajectory. Meanwhile, the robot trajectory control system based on the inverse dynamics was established. Finally, three kinds of articulated robot's trajectory control methods were compared and tested in the dynamics simulation. According to the comparisons of the parameters of trajectory following error and driven torque, it proved that the articulated robot trajectory control system based on the combination of RNEC and acceleration feedback has high following accuracy and obvious trajectory control effect, which is an excellent torque control method.

Key words articulated robot; inverse dynamics; dynamics simulation; trajectory planning; trajectory control; joint space

当前,机器人的应用范围已经扩展到人类生产和生活的各个方面,极大地影响和促进了工业、国防和科技事业的发展^[1-3].但同时人们对机器人的工作效率和运动平稳度的要求也日渐增高,使得提高机器人的工作效率、优化机器人的轨迹

控制方案成为机器人应用亟待解决的关键性问题^[4-6].本课题针对机器人关节空间内的轨迹规划和基于逆动力学方程的关节型机器人轨迹控制的方法进行了研究,并建立了基于逆动力学控制器和加速度反馈的关节型机器人的轨迹控制系

收稿日期 2013-07-10.

作者简介 陈培华(1985-),男,博士研究生, E-mail: cph@sjtu.edu.cn.

基金项目 国家高技术研究发展计划资助项目(2007AA041602, 2011AA040801, 2012AA041401).

统,同时在二自由度关节型机器人上进行了仿真验证,达到了较好的轨迹控制和跟踪性能并优化了控制方案。

1 机器人关节空间内的轨迹规划

在关节型机器人的运动过程中,当仅给定初始点和目标位置定位点时,还必须对未给定位置的区间设定适当的轨迹。因为机器人在任务空间中的末端轨迹可以通过逆运动学转换为其在关节坐标系下的运动轨迹,所以此处仅讨论机器人在关节空间内的轨迹规划。为获得在关节空间内连续、平滑的运动和轨迹,研究者通常采用抛物线、三次、四次、五次等多项式插值拟合的方法^[7,8]。

在自由度为 n 的机器人关节空间中,若已知机器人各个关节的初始位置 θ_0 和终点位置 θ_1 ($\theta_0, \theta_1 \in \mathbb{R}^n$),当机器人的运动轨迹满足边界条件

$$\begin{cases} \theta(0) = \theta_0, \theta(t_f) = \theta_1; \\ \dot{\theta}(0) = \dot{\theta}_0, \dot{\theta}(t_f) = \dot{\theta}_1; \\ \ddot{\theta}_0 = \ddot{\theta}_1 = 0 \end{cases} \quad (1)$$

时,可以用一个五次多项式函数插值拟合机器人的运动轨迹

$$\theta(t) = at^5 + bt^4 + ct^3 + dt^2 + et + f, \quad (2)$$

式中 a, b, c, d, e, f 均为 n 维向量。

分别代入约束条件(1)中,可以求得各变量的值:

$$\begin{aligned} f &= \theta_0, \quad e = \dot{\theta}_0, \quad d = 0, \\ c &= [10(\theta_1 - \theta_0) - (6\dot{\theta}_0 + 4\ddot{\theta}_0)t_f]/t_f^3, \\ b &= [-15(\theta_1 - \theta_0) + (8\dot{\theta}_0 + 7\ddot{\theta}_0)t_f]/t_f^4, \\ a &= [6(\theta_1 - \theta_0) - 3(\dot{\theta}_0 + \ddot{\theta}_0)t_f]/t_f^5. \end{aligned} \quad (3)$$

将以上各值代入式(2)即可求得机器人的运动轨迹,进而确定机器人在各时刻下各关节的位置、速度和加速度等信息。采用五次多项式函数插值拟合的机器人时间最优轨迹规划,可以提高关节型机器人的工作效率。

2 关节型机器人的逆动力学分析

基于逆动力学方法的关节型机器人轨迹控制,主要依靠计算关节型机器人各关节的驱动力矩使机器人按照期望的轨迹运动。为了计算机器人各关节的驱动力矩,通常有PID控制和逆动力学计算等方法。本文采用计算复杂度为 $O(n)$ 的迭代牛顿-欧拉算法(RNE),实现了关节型机器人的快速力矩求解。

根据牛顿-欧拉方程,描述关节型机器人中一

个连杆 i 的动力学方程为

$$f_{zi} = m_i \ddot{c}_i; \quad (4)$$

$$\tau_i^{(e)} = I_i \dot{\omega}_i + \omega_i \times I_i \omega_i, \quad (5)$$

式中: f_{zi} 为作用在质心上的合力; m_i 为连杆的质量; c_i 为连杆质心在世界坐标系中的位置; $\tau_i^{(e)}$ 为绕质心的外力矩; I_i 和 ω_i 分别代表连杆在世界坐标系中绕质心的惯量矩阵和角速度。

由空间向量代数^[10-11],连杆在世界坐标系中的速度 $v_i = \dot{c}_i - \omega_i \times c_i$,将其微分后的结果代入式(4),则有

$$f_{zi} = m_i [\ddot{v}_i - \dot{c}_i \times \dot{\omega}_i + \omega_i \times (v_i + \omega_i \times c_i)]. \quad (6)$$

另外,作用于质心上的合力 f_{zi} 和 $\tau_i^{(e)}$ 产生的世界坐标系下的合力矩为

$$\tau_{zi} = \tau_i^{(e)} + c_i \times f_{zi} = I_i \dot{\omega}_i + \omega_i \times I_i \omega_i + m_i \times c_i \times [\ddot{v}_i - \dot{c}_i \times \dot{\omega}_i + \omega_i \times (v_i + \omega_i \times c_i)]. \quad (7)$$

将式(6)和式(7)整理成矩阵形式,并用空间速度矢量 $\dot{X}_i = [v_i, w_i]^T$ 来表示

$$[f_{zi}, \tau_{zi}]^T = I_i^S \dot{X}_i + \dot{X}_i \times I_i^S \dot{X}_i, \quad (8)$$

式中 I_i^S 是 6×6 的空间惯性对称矩阵,

$$I_i^S = \begin{bmatrix} m_i E & m_i \hat{c}_i^T \\ m_i \hat{c}_i & m_i \hat{c}_i \hat{c}_i^T + I \end{bmatrix}. \quad (9)$$

在关节型机器人的连杆系统中,作用于连杆 i 上的合力和合力矩可表示为

$$\begin{bmatrix} f_{zi} \\ \tau_{zi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_i \\ \tau_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} f_i^E \\ \tau_i^E \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} f_{i+1} \\ \tau_{i+1} \end{bmatrix}, \quad (10)$$

式中: f_i 和 τ_i 为连杆 i 上来自母连杆的力和力矩; f_i^E 和 τ_i^E 为来自外界环境的作用力和力矩(如冲击力、重力等); f_{i+1} 和 τ_{i+1} 为来自其子连杆的反作用力和力矩。将式(10)代入式(8)并整理,可得到关于力和力矩的递归方程

$$\begin{bmatrix} f_i \\ \tau_i \end{bmatrix} = I_i^S \dot{X}_i + \dot{X}_i \times I_i^S \dot{X}_i - \begin{bmatrix} f_{i+1} \\ \tau_{i+1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} f_i^E \\ \tau_i^E \end{bmatrix}. \quad (11)$$

如果连杆 i 为关节型机器人的末端连杆,那么计算 f_i, τ_i 时,令 f_{i+1} 和 τ_{i+1} 为零。当该连杆不受外部施加力时, f_i^E 和 τ_i^E 仅指重力和重力矩;反之, f_i^E 和 τ_i^E 包括了重力项和外力项。因此,可以由机器人末端连杆逐步向身体端计算所有关节上的力和力矩,而关节轴上的扭矩为

$$u_i = s_i^T [f_i, \tau_i]^T, \quad (12)$$

式中 $s_i \in \mathbb{R}^6$ 是一个由关节坐标系到世界坐标系的映射向量。

根据前文轨迹规划所求得的各时刻下各关节的位置、速度和加速度等数据,代入式(11)和(12),即可计算出关节型机器人各关节在不同时

刻下的驱动力矩,进而实现对关节型机器人的快速、高精度的轨迹控制。

3 关节型机器人轨迹控制系统设计

根据前文所述,关节型机器人的轨迹控制系统设计包括关节空间内的轨迹规划、力矩控制器和机器人系统等,系统结构如图 1 所示。



图 1 关节型机器人的轨迹控制系统组成

关节型机器人的轨迹规划部分,根据输入的初始位置 θ_0 、终点位置 θ_f 、步长 t_s 和总时间 T ,按式(2)可以计算出一条连续、光滑的运动轨迹,同时输出各时刻下的位置 θ 、速度 $\dot{\theta}$ 和加速度 $\ddot{\theta}$ 。依据以上输出结果以及机器人自身动力学参数等信息,关节型机器人的力矩控制器可以按照式(11)和式(12)计算出各关节轨迹控制所需的驱动力矩,并输出至机器人系统,促使其按照期望的轨迹进行运动。

为了实现关节型机器人的力矩控制,传统的有 PID 控制方法,图 2 即为一个基于 PD 控制器的机器人轨迹控制系统,其中 JSTP 代表关节空

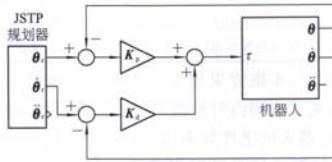


图 2 基于 PD 控制的轨迹控制系统

间轨迹规划器(joint space trajectory planner),该方法容易实现,其驱动力矩的计算如下

$$\tau = K_p(\theta_e - \theta) + K_d(\dot{\theta}_e - \dot{\theta}),$$

式中: θ_e 和 θ 分别为期望和实际的关节运动; K_p , $K_d \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 为常数对角矩阵; $\theta_e - \theta = e$ 为机器人的轨迹跟踪误差。

虽然基于 PD 控制的轨迹控制系统容易实现,但是 PD 参数调节繁琐且机器人无法实现精确的动力学建模,导致很难达到理想控制目标。采用逆动力学方法的力矩控制器,可以避免上述问题,实现准确的力矩控制。此处可引入一种采用迭代牛顿-欧拉算法的力矩控制器(RNEC)及其轨迹控制系统。为简化说明,此处的动力学方程可写成如下格式^[12]

$$\tau = D(\theta) \cdot \ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta}) \cdot \dot{\theta} + g(\theta),$$

式中: θ , $\dot{\theta}$ 和 $\ddot{\theta}$ 为 RNEC 的输入,此时分别等于

θ_e , $\dot{\theta}_e$ 和 $\ddot{\theta}_e$; $D(\theta) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 为惯性矩阵; $C(\theta, \dot{\theta}) \cdot \dot{\theta}$ 为离心力和科氏力的向量; $g(\theta)$ 为重力项。

若机器人的初始位置和速度与期望的初始位置和速度一致,机器人将很好地跟踪期望轨迹;若不一致,基于 RNEC 的轨迹控制系统则不能修正初始条件误差。为解决该问题并提高轨迹跟踪性能,引入了状态反馈,即增加一个加速度反馈环节,如图 3 所示。此时,机器人系统动力学方程为 $\tau = D(\theta) \cdot (\ddot{\theta}_e + K_d \dot{e} + K_p e) + C(\theta, \dot{\theta}) \cdot \dot{\theta} + g(\theta)$,逆动力学控制器(RNEC)的输入分别为 θ_e , $\dot{\theta}_e$ 和 $\ddot{\theta}_e + K_d \dot{e} + K_p e$ 。

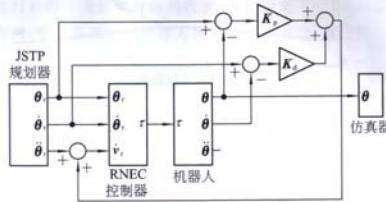


图 3 基于 RNEC 和加速度反馈的轨迹控制系统的 Simulink 模型

4 仿真实验与结果分析

为了评价上述轨迹规划算法以及逆动力学计算方法的有效性和实用性,在 Matlab 中对三种关节型机器人的轨迹控制系统进行了动力学的仿真验证和比较。实验对象为一个二自由度的关节型机器人,具体参数为:实验要求机器人从初始位置 $\theta_0 = [0 \ 0]^T$ 运动到终点位置 $\theta_f = [\pi/4, -\pi/4]^T$, 初始和终点时刻时各关节的角速度均为 0 rad/s, 运动总时间 $T = 5$ s, 采样时间 $t_s = 5$ ms, 自由度 $n=2$, 关节行程 θ_{lim} 为 $(-160^\circ \sim 160^\circ)$, DH 参数 (a, α, d, θ) 为 $(0.2, 0, 0, \theta_1)$ 和 $(0.2, 0, 0, \theta_2)$, 连杆质量 $m_i = 2$ kg, 连杆质心 $c_m = (-0.1, 0, 0)^T$, 连杆惯性张量 $I = \text{diag}(0.0267, 0.0267, 0.0267)$, 连杆科氏摩擦系数 $T_c = [0.395, -0.395]^T$, 电机惯量 $J_m = 2.0 \times 10^{-4}$, 电机齿轮齿数比 $G=60, i=1, 2$ 。

利用 Matlab/Simulink 对上述三种关节型机器人的轨迹控制系统进行建模和仿真^[13-14]。第 1 种方案为基于 PD 控制的轨迹控制系统,其中包括 JSTP, PD 控制器、二自由度关节型机器人 Robot 和一个动力学仿真显示模块 plot。第 2 种方案为基于 RNEC 的轨迹控制系统,其中包括了 JSTP, RNEC 控制器、Robot 模块和 plot 模块。第 3 种方案即为基于 RNEC 和加速度反馈的轨迹控

制系统方案,如图 3 所示。该控制系统包括了 JSTP 规划器、RNEC 控制器、二自由度关节型机器人 Robot、动力学仿真显示模块 plot 和一个加速度反馈控制器。

方案 1 机器人进行动力学仿真后得到的关节轨迹跟踪误差和关节驱动力矩(即扭矩)如图 4 所示。实验中, $K_p = \text{diag}(9000, 9000)$, $K_d = \text{diag}(160, 160)$ 。

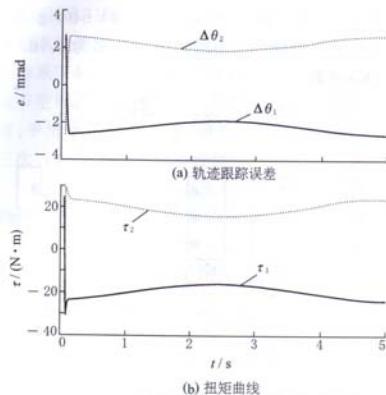


图 4 跟踪误差和扭矩曲线(PD 控制)

方案 2 在机器人的动力学仿真中所得到的关节轨迹跟踪误差和驱动力扭矩曲线见图 5。

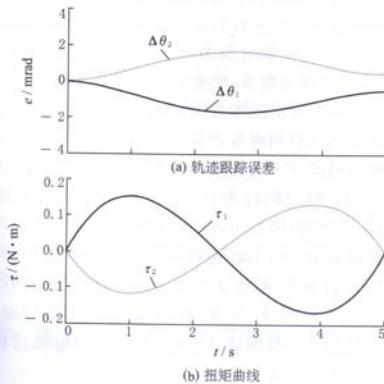


图 5 跟踪误差和扭矩曲线(RNEC 控制)

采用图 3 所示的第 3 种方案进行机器人的动力学仿真,结果见图 6。控制系统内加速度反馈环节中的参数取值为 $K_p = \text{diag}(80, 80)$, $K_d = \text{diag}(10, 10)$ 。

实验结果比较见表 1。由表 1 可以得出:在方案 2 中,机器人关节的最大跟踪误差约为 1.7

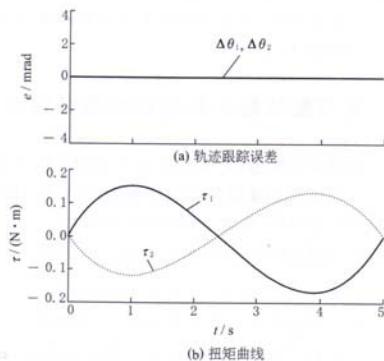


图 6 跟踪误差和扭矩曲线
(带反馈的 RNEC 控制)

mrad,最大扭矩约为 0.17 N·m,均小于方案 1 中的结果;采用 RNEC 和加速度反馈的轨迹控制系统时,关节最大的轨迹跟踪误差仅为 0.0378 mrad,远小于前两种控制方案,最大扭矩约为 0.17 N·m,同方案 2 的结果相似。

表 1 实验结果

| 性能参数 | 轨迹控制方案 | | |
|----------------------------|--------|--------|--------|
| | 1 | 2 | 3 |
| $\max(e)/\text{mrad}$ | 2.6400 | 1.7000 | 0.0378 |
| $\max(\tau)/(N \cdot m)$ | 30.73 | 0.17 | 0.17 |

综上,本研究采用五次多项式插值拟合的方法,在关节空间内对机器人进行轨迹规划,有效提高了机器人的工作效率;同时,建立了基于迭代牛顿-欧拉算法的关节型机器人逆动力学方程以及三种机器人的轨迹控制系统;经过动力学仿真实验的比较,证明了基于 RNEC 和加速度反馈的机器人轨迹控制系统具有较高的跟随精度、较明显的轨迹控制效果,是一种较优的力矩控制方法。

参 考 文 献

- [1] Brogardh T. Present and future robot control development—an industrial perspective [J]. Annual Reviews in Control, 2007, 31(1): 69-79.
- [2] Putz P. Space robotics[J]. Reports on Progress in Physics, 2002, 65(3): 421-463.
- [3] Lanfranca A R, Castellanos A E, Desai J P, et al. Robotic surgery: a current perspective[J]. Annals of Surgery, 2004, 239(1): 14-21.
- [4] Su Y X, Zheng C H. Global finite-time inverse tracking control of robot manipulators[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2011, 27(3): 550-557.

(下转第 24 页)