一种考虑运动学和动力学参数不确定的机器人自适应控制方法

李剑飞*, 张大伟, 王耀兵

北京空间飞行器总体设计部, 空间智能机器人系统技术与应用北京市重点实验室, 北京 100094

*联系人, E-mail: lijianfei_hit@foxmail.com

收稿日期: 2018-08-23; 接受日期: 2018-10-30; 网络出版日期: 2018-12-29

国家自然科学基金(编号: 61733001)资助项目

摘要 在机器人精细操控任务中, 模型准确性的缺失会影响机器人的控制性能, 现有的自适应控制方法可以有效解决动力学参数存在不确定性的机器人控制问题, 然而运动学参数不准确或未知的情况也普遍存在, 往往这种不确定性会给机器人的位姿控制精度带来更大的影响. 虽然有些研究试图通过视觉等测量方式实现运动学模型的估计, 但是迄今为止, 同时考虑动力学参数和运动学参数不确定性的研究仍然少见. 本文提出了一种自适应算法, 同时考虑运动学和动力学参数的不确定性, 在无需测量机器人末端速度的条件下得到了笛卡儿空间全局渐近稳定的轨迹跟踪控制, 相比于已有方法计算更小量、更简洁、易实现. 通过一个二自由度机械臂的仿真案例验证了所提方法的有效性.

关键词 机器人, 自适应, 参数不确定

PACS: 45.40.Ln, 45.80.+r, 05.45.-a

1 引言

人类常常不能从环境中获得足够精确的信息, 但是却能凭借学习的能力和经验丰富的完成各种操作. 比如人类并不知悉自己手臂的尺寸、关节的角度, 却可以抓住飞来的未知重量的篮球, 能利用大小不一的笔在纸上书写和绘画. 这一切得以实现的原因, 在于人类能用眼睛感知双手以及目标的相对关系, 能通过手臂控制它所施加的力, 并通过大量的训练与推理弥补不确定的信息, 形成了自然而然的动作.

相比之下, 机器人若要较好地完成精细操作, 则需要知道自身和目标的运动学和动力学参数以及精确地测量自身和目标的运动状态. 在完成笛卡儿空间的轨迹跟踪任务时, 首先要求解逆运动学, 由笛卡儿空间的轨迹得到关节空间的轨迹, 然后求解逆动力学(或利用基于动力学的控制算法), 得到关节的输出力和力矩. 然而正如人类对世界的感知是不全面的, 机器人也常常不能精确测量所需的环境信息, 更何况有些信息(如多个负载)还是不断变化的、不可测量或者需要很大代价获得的. 使用不准确的信息将会大大削弱基于

引用格式: 李剑飞, 张大伟, 王耀兵. 一种考虑运动学和动力学参数不确定的机器人自适应控制方法. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2019, 49: 024518
Li J F, Zhang D W, Wang Y B. Adaptive control for robots with uncertain kinematic and dynamic parameters (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2019, 49: 024518, doi: [10.1360/SSPMA2018-00295](https://doi.org/10.1360/SSPMA2018-00295)

动力学模型控制算法的效果. 因此, 若能通过算法实现机器人如人类那样具备处理多种不确定信息的能力将会大大提高机器人在任务中的适应性.

针对动力学参数的不确定性, 大量的自适应算法被提出来, 他们主要可以分为两类: 一类以关节输出的预测误差作为参数辨识的驱动信号^[1,2], 它的参数辨识和控制较为独立, 控制部分直接使用辨识的结果; 另一类以跟踪误差作为参数辨识的驱动信号^[3-7], 它的特点是无论参数辨识是否收敛, 跟踪误差都是收敛的. 还有的方法将两种自适应相结合^[8,9], 可以得到更优的结果. 但是在这些研究中, 运动学参数都认为是精确可知的.

也有一些研究针对运动学参数的不确定性提出自适应算法. 如文献[10,11]中用参数辨识方法估计机器人系统的运动学或者雅可比矩阵, 文献[12]中关于未知雅可比矩阵采用自适应方法来计算逆运动学问题. 直接估计雅可比矩阵的方法假设雅可比矩阵是慢变的, 这在许多任务中是不能成立的. 并且上述方法没有同时考虑动力学参数的不确定性, 如果单纯地将动力学自适应方法和运动学自适应方法组合, 一般并不能得出稳定性结论.

目前同时考虑运动学和动力学不确定性且得出全局渐近稳定结论的研究较少. 考虑动力学和运动学不确定性的文献[13]针对点到点的控制问题得出了半全局稳定的自适应算法, 文献[14]在一定假设下设计了基于无源理论的任务空间轨迹跟踪自适应算法, 文献[15]在文献[14]的基础上基于逆动力学方法设计了轨迹跟踪自适应控制器.

文献[14,15]使用了低通滤波器以获得机器人末端速度, 并且算法较为复杂, 文献[15]中的算法还要求解惯性阵的逆以及测量角加速度. 因此, 本文设计了一种新的考虑运动学和动力学不确定性的机器人自适应控制方法. 它具有如下的特点: (1) 存在运动学参数和动力学参数不确定性的情况下, 保证笛卡儿空间轨迹跟踪的全局渐近稳定性. (2) 算法仅需要测量机器人末端位姿, 不需测量速度. (3) 算法无需求惯性矩阵的逆, 无需测量角加速度, 且比文献[14]的方法更简洁易实现.

2 机器人运动学与动力学

机器人运动学问题可以简单描述为由关节空间轨

迹求解任务空间轨迹的问题. $X \in \mathbb{R}^m$ 表示机器人末端执行器于任务空间的坐标, $q \in \mathbb{R}^n$ 为对应的关节空间坐标, 则有

$$X(t) = f(q(t)), \quad (1)$$

其中 $f(\cdot) \in \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m (m \leq n)$ 是关节空间到任务空间的非线性向量函数. 一般 $q(t)$, $X(t)$ 为关于时间的连续可微函数. 表达在速度层面上有

$$\dot{X}(t) = J(q(t))\dot{q}(t), \quad (2)$$

其中 $J(q) = \frac{\partial f(q)}{\partial q^T} \in \mathbb{R}^{m \times n}$ 为雅可比矩阵. 由以上可知逆运动学问题可以归结为求解一簇非线性方程组(1)式的根的问题. 如果 $m = n$, 在给定的 $q(0)$ 且不经奇点的情况下一般(1)式只有单一解; 如果 $m < n$, 在 $q(0)$ 给定且不经奇点时, (1)式有无限组解, 解空间的维度等于冗余度 $n - m$.

考虑存在运动学不确定性的情况, 这种不确定性包括尺寸(长度)参数和角度参数, 在数学模型里表现为机器人处于零位状态时各杆本体坐标系间的平移参数和旋转参数. 机器人的运动学存在以下性质.

性质1^[15]: 机器人末端的速度与选定的一组运动学常量参数 θ_k 是线性关系. 即

$$\dot{X} = J\dot{q} = Y_k(q, \dot{q})\theta_k, \quad (3)$$

其中 Y_k 为关于关节坐标、速度的线性回归矩阵, $\theta_k \in \mathbb{R}^q$ 为选定的运动学参数, 包括尺寸参数以及尺寸参数与角度的三角函数的积.

基于欧拉-拉格朗日方法, 具有 n 个关节的机器人的动力学方程表示在关节空间为

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = \tau, \quad (4)$$

其中 $M(q) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 是正定的惯性矩阵, $C(q, \dot{q}) \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $C(q, \dot{q})\dot{q}$ 为包含离心力项和科氏力项, $G(q) \in \mathbb{R}^n$ 为重力项, $\tau \in \mathbb{R}^n$ 是关节力或力矩.

性质2^[16]: 对(4)式中的矩阵 M , 可以适当地选定一种矩阵 C 的写法, 使 $\dot{M} - 2C$ 是对称矩阵.

性质3^[17]: 动力学方程(4)式关于一组选定的惯性参数为线性关系, 即

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = Y(q, \dot{q}, \ddot{q})\theta, \quad (5)$$

其中 Y 为关于关节坐标、速度和加速度的回归量, $\theta \in \mathbb{R}^p$ 为选定的惯性参数.

3 考虑运动学和动力学不确定性的自适应控制方法

本节首先推导一种自适应逆运动学方法, 用于解决存在运动学不确定性的笛卡儿空间轨迹跟踪问题, 在此基础上同时考虑动力学不确定性重新分析 Lyapunov 函数, 最终设计得到全局渐近稳定的算法.

3.1 考虑运动学不确定性的自适应控制方法

问题描述为: 考虑由(1)–(3)式描述的机器人运动学问题, 欲跟踪一笛卡儿空间的曲线 $X_c(t)$ (速度为 $\dot{X}_c(t)$), q_0 为任务初始时的关节坐标, 并记 $q_c(t) = f^{-1}(X_c(t))$ 为运动学逆解的真值. 在存在运动学不确定参数的情况下求关节空间轨迹 $q_r(t)$.

记 $\hat{J}$ 为 J 的估计值, 取控制律

$$\begin{aligned} \dot{q}_r(t) &= \hat{J}^{-1}(q) [\mathbf{K}_v(X_c(t) - X(t)) + \dot{X}_c(t)], \\ q_r(t) &= q_0 + \int_0^t \dot{q}_r dt, \\ X(t) &= f(q_r(t)), \end{aligned} \quad (6)$$

其中 $\mathbf{K}_v$ 为正定常矩阵. 取自适应律为

$$\dot{\hat{\theta}}_k = -\mathbf{K}_B \mathbf{Y}_k^T(q_r, \dot{q}_r) e_x, \quad (7)$$

其中 $\mathbf{K}_B$ 为正定常矩阵. 闭环系统方程为

$$\begin{aligned} &[\mathbf{K}_v(X_c(t) - X(t)) + (\dot{X}_c(t) - \dot{X}(t))] \\ &= \hat{J}(q_r) \dot{q}_r - J(q_r) \dot{q}_r \\ &= \mathbf{Y}_k(q_r, \dot{q}_r) \hat{\theta}_k. \end{aligned} \quad (8)$$

定理1: 对于机器人运动学(1)和(2)式和控制律(6)式以及自适应律(7)式, 有

$$e_x \rightarrow 0, \quad (9)$$

$$e \rightarrow 0, \quad (10)$$

$$\mathbf{Y}_k \hat{\theta}_k \rightarrow 0, \quad (11)$$

其中 $e = q_c(t) - q_r(t)$, $e_x = X_c - X$, $\hat{\theta}_k = \theta_k - \hat{\theta}_k$, $\hat{\theta}_k$ 为 θ_k 的估计值.

证明: 取候选李雅普诺夫函数

$$V = \frac{1}{2} e_x^T e_x + \frac{1}{2} \hat{\theta}_k^T \mathbf{K}_B^{-1} \hat{\theta}_k,$$

则对时间求导

$$\begin{aligned} \dot{V} &= e_x^T \mathbf{K}_v \dot{e}_x + \hat{\theta}_k^T \mathbf{K}_B^{-1} \dot{\hat{\theta}}_k \\ &= -e_x^T \mathbf{K}_v e_x - e_x^T \mathbf{Y}_k(q, \dot{q}) \hat{\theta}_k + (e_x^T \mathbf{Y}_k(q, \dot{q}) \mathbf{K}_B) \mathbf{K}_B^{-1} \hat{\theta}_k \\ &= -e_x^T \mathbf{K}_v e_x \\ &\leq 0, \end{aligned} \quad (12)$$

其中 $\dot{V}$ 为半负定, 且 $\dot{V} \equiv 0 \Rightarrow e_x \equiv 0$, 从而运用 LaSalle 不变原理当 $t \rightarrow \infty$, 有 $X(t) \rightarrow X_c(t)$, $\dot{X}(t) \rightarrow \dot{X}_c(t)$, 进而得到 $q_r(t) \rightarrow q_c(t)$, $\dot{q}_r(t) \rightarrow \dot{q}_c(t)$. 且 $\dot{V} \equiv 0$ 时, $e_x \equiv 0 \rightarrow \dot{e}_x \equiv 0$, 则由(8)式得 $\mathbf{Y}_k \hat{\theta}_k \equiv 0$, 故必有当 $t \rightarrow \infty$, $\mathbf{Y}_k \hat{\theta}_k \rightarrow 0$. 在持续激励条件下进一步可得 $\hat{\theta}_k \rightarrow 0$.

3.2 考虑运动学和动力学不确定性的自适应控制方法

上述自适应逆运动学算法如果直接与惯性参数不确定的自适应控制算法结合使用可能引起不稳定. 因为二者的不确定性会相互耦合. 因此必须综合考虑两种不确定性均存在时的系统方程, 利用 Lyapunov 方法同时分析和设计两个自适应律以及控制律.

问题描述为: 考虑由(1)–(3)式描述的机器人运动学问题, 以及由(4)和(5)式描述的机器人动力学方程, 欲跟踪一笛卡儿空间的曲线 $X_c(t)$ (速度为 $\dot{X}_c(t)$), q_0 为任务初始时的关节坐标, 并记 $q_c(t) = f^{-1}(X_c(t))$ 为运动学逆解的真值. 在存在运动学和动力学不确定参数的情况下设计渐近稳定的控制律以及运动学和动力学自适应律.

关节空间的参考角速度用(13)式计算

$$\dot{q}_r = \hat{J}^{-1}[\dot{X}_c + \mathbf{K}_v(X_c - X)]. \quad (13)$$

为了不使用末端速度的测量值, 关节空间的参考角加速度采用(14)式的估计值.

$$\begin{aligned} \hat{\ddot{q}}_r &= \hat{J}^{-1}[\ddot{X}_c + \mathbf{K}_v(\dot{X}_c - \hat{\dot{X}})] \\ &\quad + \frac{d}{dt}(\hat{J}^{-1})[\dot{X}_c + \mathbf{K}_v(X_c - X)] \\ &= \hat{J}^{-1}[\ddot{X}_c + \mathbf{K}_v(\dot{X}_c - \hat{\dot{X}})] \\ &\quad - \hat{J}^{-1} \dot{\hat{J}} \hat{J}^{-1}[\dot{X}_c + \mathbf{K}_v(X_c - X)] \\ &= \hat{J}^{-1}[\ddot{X}_c + \mathbf{K}_v(\dot{X}_c - \hat{\dot{X}})] - \hat{J}^{-1} \dot{\hat{J}} \dot{q}_r, \end{aligned} \quad (14)$$

其中 $\widehat{X} = \mathcal{J}\dot{q}$. 取控制律

$$\begin{aligned}\tau &= \widehat{M}\widehat{\ddot{q}}_r + \widehat{C}\widehat{\dot{q}}_r + \widehat{G} + \mathbf{K}_d r + \widehat{\mathcal{J}}^T \mathbf{K}_p e_x \\ &= Y(q, \dot{q}, \ddot{q}, \widehat{\ddot{q}}_r) \widehat{\theta} + \mathbf{K}_d r + \widehat{\mathcal{J}}^T \mathbf{K}_p e_x,\end{aligned}\quad (15)$$

其中 $r = \dot{q}_r - \dot{q}$, $\mathbf{K}_d \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $\mathbf{K}_p \in \mathbb{R}^{m \times m}$, 有 $\mathbf{K}_v \mathbf{K}_p$ 为正定常矩阵. $\widehat{M}$, $\widehat{C}$, $\widehat{G}$ 为 M , C , G 的估计值, $\widehat{\theta}$ 为 θ 的估计值.

设计自适应律

$$\dot{\widehat{\theta}} = \mathbf{K}_A Y^T r, \quad (16)$$

$$\dot{\widehat{\theta}}_k = -\mathbf{K}_B Y_k^T(q, \dot{q}) \mathbf{K}_p e_x + \mathbf{K}_B Y_k^T(q, \dot{q}) \mathbf{K}_v \widehat{\mathcal{J}}^T \widehat{M} r, \quad (17)$$

其中 $\mathbf{K}_A$ 为正定常矩阵.

定理2: 对于机器人系统(4)式和控制律(15)式以及自适应律(16), (17)式, 有

$$e_x \rightarrow 0, \quad t \rightarrow \infty. \quad (18)$$

证明: 由(4), (13)–(15)式得闭环方程为

$$\begin{aligned}\mathbf{M}\dot{r} + \mathbf{C}r + \mathbf{K}_d r + \widehat{\mathcal{J}}^T \mathbf{K}_p e_x \\ = Y(q, \dot{q}, \ddot{q}, \widehat{\ddot{q}}_r) \widehat{\theta} - \widehat{M} \widehat{\mathcal{J}}^{-1} \mathbf{K}_v Y_k(q, \dot{q}) \widehat{\theta}_k,\end{aligned}\quad (19)$$

取候选Lyapunov函数

$$V = \frac{1}{2} r^T \mathbf{M} r + \frac{1}{2} e_x^T \mathbf{K}_p e_x + \frac{1}{2} \widehat{\theta}^T \mathbf{K}_A^{-1} \widehat{\theta} + \frac{1}{2} \widehat{\theta}_k^T \mathbf{K}_B^{-1} \widehat{\theta}_k, \quad (20)$$

对时间求导有

$$\begin{aligned}\dot{V} &= r^T \mathbf{M} \dot{r} + \frac{1}{2} r^T \dot{\mathbf{M}} r + \dot{e}_x^T \mathbf{K}_p e_x + \widehat{\theta}^T \mathbf{K}_A^{-1} \dot{\widehat{\theta}} \\ &\quad + \widehat{\theta}_k^T \mathbf{K}_B^{-1} \dot{\widehat{\theta}}_k \\ &= -r^T \mathbf{K}_d r - r^T \widehat{\mathcal{J}}^T \mathbf{K}_p e_x - r^T \widehat{M} \widehat{\mathcal{J}}^{-1} \mathbf{K}_v Y_k(q, \dot{q}) \widehat{\theta}_k \\ &\quad + \dot{e}_x^T \mathbf{K}_p e_x + r^T Y \widehat{\theta} + \widehat{\theta}^T \mathbf{K}_A^{-1} \dot{\widehat{\theta}} + \widehat{\theta}_k^T \mathbf{K}_B^{-1} \dot{\widehat{\theta}}_k,\end{aligned}\quad (21)$$

其中用到了 $\dot{\mathbf{M}} - 2\mathbf{C}$ 的反对称性. 由(13)式得

$$\dot{e}_x = -\mathbf{K}_v e_x + \widehat{\mathcal{J}} \dot{q}_r - \mathbf{J} \dot{q}, \quad (22)$$

从而

$$\begin{aligned}& -r^T \widehat{\mathcal{J}}^T \mathbf{K}_p e_x + \dot{e}_x^T \mathbf{K}_p e_x \\ &= -e_x^T \mathbf{K}_v \mathbf{K}_p e_x + (\widehat{\mathcal{J}} \dot{q}_r - \mathbf{J} \dot{q} - \widehat{\mathcal{J}} r)^T \mathbf{K}_p e_x \\ &= -e_x^T \mathbf{K}_v \mathbf{K}_p e_x + (\widehat{\mathcal{J}} \dot{q} - \mathbf{J} \dot{q})^T \mathbf{K}_p e_x \\ &= -e_x^T \mathbf{K}_v \mathbf{K}_p e_x - \widehat{\theta}_k^T Y_k^T(q, \dot{q}) \mathbf{K}_p e_x,\end{aligned}\quad (23)$$

因此有

$$\begin{aligned}\dot{V} &= -r^T \mathbf{K}_d r - e_x^T \mathbf{K}_v \mathbf{K}_p e_x + \widehat{\theta}_k^T (-Y_k^T(q, \dot{q}) \mathbf{K}_p e_x \\ &\quad - Y_k^T(q, \dot{q}) \mathbf{K}_v \widehat{\mathcal{J}}^{-T} \widehat{M} r + \mathbf{K}_B^{-1} \dot{\widehat{\theta}}_k) + \widehat{\theta}^T (Y^T r + \mathbf{K}_A^{-1} \dot{\widehat{\theta}}).\end{aligned}\quad (24)$$

由自适应律(16)和(17)式, 则有 $\dot{V} = -r^T \mathbf{K}_d r - e_x^T \mathbf{K}_v \mathbf{K}_p e_x$ 为半负定, 且 $\dot{V} \equiv 0 \Rightarrow r \equiv 0, e_x \equiv 0$, 运用LaSalle不变原理, 当 $t \rightarrow \infty$, 则必有 $r \rightarrow 0, e_x \rightarrow 0$.

以上方法在考虑运动学和动力学参数不确定性的条件下实现了笛卡儿空间轨迹跟踪的全局渐近稳定性, 进一步可以证明在持续激励条件下被估计参数可以收敛到真实值.

4 仿真结果

考虑具有两个转动关节的平面机械臂, 两杆质量均匀分布, 如图1所示, 其运动学和动力学参数见表1. 惯性参数的向量为 $\theta = [m_1 \quad I_1 \quad m_2 \quad I_2]^T$, 分别为两个杆的质量与转动惯量(I_1 相对转轴, I_2 相对质心).

取 $X = [x, y]^T$, 其运动学模型为

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1 \cos(q_1) + l_2 \cos(q_1 + q_2) \\ l_1 \sin(q_1) + l_2 \sin(q_1 + q_2) \end{bmatrix}, \quad (25)$$

$$\dot{X} = \mathbf{J} \dot{q}, \quad (26)$$

其中

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} -l_1 \sin(q_1) - l_2 \sin(q_1 + q_2) & -l_2 \sin(q_1 + q_2) \\ l_1 \cos(q_1) + l_2 \cos(q_1 + q_2) & l_2 \cos(q_1 + q_2) \end{bmatrix}, \quad (27)$$

令 $\theta_k = \begin{bmatrix} l_1 \\ l_2 \end{bmatrix}$, 有

$$\begin{aligned}\mathbf{J} \dot{q} &= \begin{bmatrix} -\dot{q}_1 \sin(q_1) & -(\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \sin(q_1 + q_2) \\ \dot{q}_1 \cos(q_1) & (\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \cos(q_1 + q_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} l_1 \\ l_2 \end{bmatrix} \\ &= Y_k(q, \dot{q}) \theta_k.\end{aligned}\quad (28)$$

令机械臂末端跟踪一个椭圆轨迹

$$\begin{aligned}x &= 0.5 + 0.2 \sin t, \\ y &= 0.1(1 - \cos t).\end{aligned}\quad (29)$$

显然, 在这个给定的轨迹中不存在机械臂的奇异状况. 给定仿真中的一些变量的初始值为

图 1 2自由度机械臂

Figure 1 A two-DOF manipulator.

表 1 机械臂参数

Table 1 The manipulator parameters

	m_i (kg)	l_i (m)	I_i (kg m ²)
Link 1	1	0.5	0.0833
Link 2	1	0.5	0.02083

$$q_0 = [1 \ -2]^T, \dot{q}_0 = [0 \ 0]^T, \hat{\theta}_{k0} = [0.4 \ 0.6]^T,$$

$$\hat{\theta}_0 = [0.5 \ 0.1 \ 0.5 \ 0.1]^T,$$

以及一些常量 $K_v = 10I_2$, $K_d = 10I_2$, $K_p = I_2$, $K_A = 100I_2$, $K_B = 1000I_2$, 并对 $\hat{\theta}$ 加入了上下限, 仿真在Simulink平台下执行。

任务空间的命令轨迹和实际轨迹见图2, 可见二者除了任务开始时有微小偏差外近乎重合; 图3给出了 $e_x = X_c - X$ 随时间变化的曲线, 由图中可知 $e_x \rightarrow 0$, 即末端位姿收敛到了命令值; 而图4说明了关节坐标 q 收敛于准确的逆位置解 q_c , 因此验证了算法在解逆运动学问题上的有效性。此外, 图5表明尺寸参数的估计

图 2 (网络版彩图)末端执行器轨迹

Figure 2 (Color online) Path of the end-effector.

图 3 (网络版彩图)末端轨迹偏差

Figure 3 (Color online) End-effector tracking errors.

图 4 (网络版彩图)关节空间偏差

Figure 4 (Color online) Joint tracking errors.

图 5 (网络版彩图)运动学参数估计值

Figure 5 (Color online) Kinematic parameter estimates.

值 $\hat{\theta}_k$ 也收敛到了真实值, 这说明任务较容易使得算法中逆运动学部分的自适应功能达到持续激励, 从而被估计值收敛到真实值。

算法中的参数设置对算法性能有如下定性的分析结果, K_d 的大小决定着 r 的收敛速度, K_p , K_d , K_v 同时决定着末端误差 e_x 的收敛速度, K_A , K_B 则影响着两个估计量的收敛速度(有持续激励时). 理论上, 上述常量取的越大, 估计量初值取的越接近实际值, 则效果越好, 但是考虑输出转矩大小是有限制的, 而且要减小动态过程中的振荡, 因此在快速性与稳定性之间要进行折衷而选择合适的参数.

5 结论

本文提出一种同时考虑运动学和动力学不确定性的机器人自适应控制方法, 在无需测量机器人末端速度的条件下可实现笛卡儿空间全局渐近稳定的轨迹跟踪, 并且在持续激励条件下运动学与动力学参数可以收敛到真实值, 相比于现有的方法更简洁易实现. 仿真实例验证了所提出算法的有效性.

参考文献

- 1 Li W, Slotine J J E. An indirect adaptive robot controller. *Syst Control Lett*, 1989, 12: 259–266
- 2 Serafi K E, Khalil W. Energy based indirect adaptive control of robots. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Sacramento: IEEE, 1991
- 3 Slotine J J E, Li W. Adaptive robot control: A new perspective. In: *Proceedings of IEEE Conference on Decision and Control*. Los Angeles: IEEE, 1987
- 4 Ortega R, Spong M W. Adaptive motion control of rigid robots: A tutorial. *Automatica*, 1989, 25: 877–888
- 5 Slotine J J E, Li W. On the adaptive control of robot manipulators. *Int J Robot Res*, 1987, 6: 49–59
- 6 Boccanfuso L, O’Kane J M. Adaptive robot design with hand and face tracking for use in autism therapy. *Inter Conf Social Robot*, 2010, 3: 265–274
- 7 Middleton R H, Goodwin G C. Adaptive computed torque control for rigid link manipulations. *Systems Control Lett*, 1986, 10: 68–73
- 8 Ciliz M K. Combined direct and indirect adaptive control of robot manipulators using multiple models. *Adv Robot*, 2006, 20: 483–497
- 9 Ioannou P, Sun J. Theory and design of robust direct and indirect adaptive-control schemes. *Int J Control*, 1988, 47: 775–813
- 10 D’Souza A, Vijayakumar S, Schaal S. Learning inverse kinematics. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Maui: IEEE, 2001
- 11 de Angulo V R, Torras C. Learning inverse kinematics: Reduced sampling through decomposition into virtual robots. *IEEE Trans Syst Man Cybern B*, 2008, 38: 1571–1577
- 12 Colbaugh R, Glass K, Seraji H. An adaptive inverse kinematics algorithm for robot manipulators. *Int J Model Simul*, 1991, 11: 33–38
- 13 Dixon W E. Adaptive regulation of amplitude limited robot manipulators with uncertain kinematics and dynamics. *IEEE Trans Automat Contr*, 2007, 52: 488–493
- 14 Cheah C C, Liu C, Slotine J J E. Adaptive tracking control for robots with unknown kinematic and dynamic properties. *Int J Robot Res*, 2006, 25: 283–296
- 15 Wang H, Xie Y. Adaptive inverse dynamics control of robots with uncertain kinematics and dynamics. *Automatica*, 2009, 45: 2114–2119
- 16 Chopra N, Spong M W. Passivity-based control of multi-agent systems. *Advances in Robot Control*, 2006: 107–134
- 17 Chung S J, Slotine J J E. Cooperative robot control and concurrent synchronization of Lagrangian systems. *IEEE Trans Robot*, 2007, 25: 686–700

Adaptive control for robots with uncertain kinematic and dynamic parameters

LI JianFei^{*}, ZHANG DaWei & WANG YaoBing

*Beijing Key Laboratory of Intelligent Space Robotic System Technology and Applications, Institute of Spacecraft System Engineering,
China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China*

In the applications of robot systems, one of the most important factors that impact the performance of the controller is the lack of the model's accuracy. The existing adaptive control methods can effectively solve the control problem of robots with dynamic uncertainties. However, it is quite common that the kinematic parameters are also inaccurate or unknown. Actually the uncertainties of the kinematic parameters often have a greater impact on the accuracy of the robot in cartesian space. Although some studies have attempted to estimate kinematic models by means of computer vision, so far, studies that take both dynamic and kinematic uncertainties into consideration are still rare. In this paper, an adaptive control algorithm for robots with uncertain kinematic and dynamic is proposed. The global asymptotically stable trajectory tracking of Cartesian space is obtained without measuring the velocity of the robot end-effector. Compared with the existing methods, it is with less computation and easier to implement. The simulation case with a two-DOFs manipulator verifies the effectiveness of the method.

robots, adaptive, parameter uncertainties

PACS: 45.40.Ln, 45.80.+r, 05.45.-a

doi: [10.1360/SSPMA2018-00295](https://doi.org/10.1360/SSPMA2018-00295)