

一类受限柔性机器人的鲁棒性力/位置控制方法*

徐建闽 朱蓓蓓 周其节

(华南理工大学自动控制工程系·广州, 510641)

摘要: 本文研究受限柔性连杆机器人的力/位置控制问题. 首先导出受限柔性机器人的动力学模型, 然后借助于微分几何理论将动力学模型转化为仿射非线性形式, 再使用非线性反馈使系统线性化, 最后对线性子系统设计变结构补偿器, 使控制方法具有较高的精度和强鲁棒性.

关键词: 受限柔性机器人; 非线性反馈; 变结构控制

1 引言

近年来, 耗能低、重量轻的机器人控制技术的研究已引起了学术界和工业界的广泛关注. 对柔性连杆机器人的控制已有不少研究成果^[1~3], 这些结果适用于不受约束的柔性臂的运动. 但在许多应用场合下(如抛光、清理毛口、装配等), 需要机器人的终端操作器与环境相接触. 这时, 机器人的控制目标不仅仅是终端操作器的运动轨迹, 还有机器人终端操作器与环境之间的相互作用力, 以避免造成过大的接触力使工作环境或机器人本身受到损坏. 这种需要考虑与外部环境接触因素的系统称为受限系统. 这样的系统可由一组微分方程和代数方程来描述^[4]. 关于受限机器人的动力学控制问题, Whitney^[5]已进行了综述, 其中包括如下方法: 阻抗控制^[6], 混合力/位置控制^[7]和其它方法. 但这些方法主要针对刚性机器人, 对于含有机构柔性的受限系统的研究则要复杂得多, 更具挑战性. 目前, 关于受限柔性机器人的力/位置控制的课题已成为一个焦点, 研究和解决这个问题具有深远的理论意义和工程应用价值.

本文以一个具有柔性前臂的两连杆受约束机器人为对象, 首先导出了受限柔性机器人的动力学模型, 借助于微分几何中李导数的概念, 将动力学模型转化为仿射非线性形式, 选择能刻画终端操作器运动位置的笛卡尔坐标和相互作用力为输出方程, 再使用基于微分几何系统理论的非线性反馈使系统线性化, 最后, 为了使控制器具有较高的精度和强鲁棒性, 对线性子系统设计了变结构补偿器.

2 受限柔性机器人的动力学模型

本文的研究对象为一具有柔性前臂的两连杆平面机器人, 其终端操作器和一约束面相接触, 如图 1 所示.

柔性臂的偏移可用 n 阶假想振型函数来近似:

$$w(l, t) = \sum_{i=1}^n \phi_i(l) \delta_i(t), \quad (1)$$

其中, $\phi_i(l)$ 为振型函数, $\delta_i(t)$ 为时变广义坐标.

柔性臂的终端操作器的笛卡尔坐标为:

$$\begin{aligned} p_t &= \begin{bmatrix} x_t \\ y_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_1 C_1 + L_2 C_{12} - w S_{12} \\ L_1 S_1 + L_2 S_{12} - w C_{12} \end{bmatrix} \\ &= R(\theta, \delta), \end{aligned} \quad (2)$$

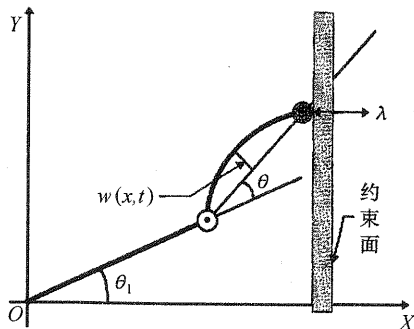


图 1 受约束两连杆柔性机器人结构图

* 国家自然科学基金(69405004)和广东省自然科学基金(940069)资助课题.

本文于 1996 年 8 月 16 日收到, 1997 年 5 月 15 日收到修改稿.

其中, $L_i (i = 1, 2)$ 为杆 i 的长度, $C_1 = \cos\theta_1, S_1 = \sin\theta_1, C_{12} = \cos(\theta_1 + \theta_2), S_{12} = \sin(\theta_1 + \theta_2)$; $\theta = [\theta_1 \ \theta_2]^T$ 为关节角度, $\delta = [\delta_1 \ \dots \ \delta_n]^T$.

关于约束面, 我们作如下假设^[8]

假设 1 当机械臂运动时, 其终端操作器总是和环境相接触.

假设 2 相对于机械臂, 约束面是刚性的, 且不会因接触而变形.

设约束面方程可描述为:

$$\phi = \Psi_1(p_i) = \Psi(\theta, \delta) = 0. \quad (3)$$

当终端操作器沿着约束面运动时, 可得雅可比矩阵:

$$J_i(\theta, \delta) = \frac{\partial \Psi}{\partial p_i} \begin{pmatrix} \frac{\partial p_i}{\partial \theta} & \frac{\partial p_i}{\partial \delta} \end{pmatrix}. \quad (4)$$

忽略外部干扰和其它未建模动力学, 受限柔性机器人的动力学方程可表为:

$$B(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q}) + Kq + D\dot{q} = Gu + J^T\lambda. \quad (5)$$

其中: $q = (\theta^T, \delta^T)^T$; B 为正定对称惯性矩阵; $C(q, \dot{q})$ 是 Coriolis 力和向心力; K 为弹性矩阵; D 为摩擦力与阻尼矩阵; u 为关节力矩向量; $\lambda \in \mathbb{R}$ 为约束力; $G = [I_{2 \times 2}^T, O_{2 \times 2}^T]^T$.

3 混合力/位置控制

3.1 仿射非线性形式

任意光滑数量函数 $k(x)$ 对向量域 $f(x)$ 的李导数定义为:

$$\begin{cases} L_f k(x) = \frac{\partial k(x)}{\partial x} f(x), \\ L_f^2 k(x) = \frac{\partial [L_f k(x)]}{\partial x} f(x), \\ L_g L_f k(x) = \frac{\partial [L_f k(x)]}{\partial x} g(x). \end{cases} \quad (6)$$

记 $x = [q^T, \dot{q}^T]^T$ 为状态向量, 则系统 (3), (5) 可写成:

$$\begin{cases} \dot{x} = \tilde{f}(x) + \tilde{g}(x)u + \tilde{h}(x)\lambda, \\ \phi = \Psi(x) = 0. \end{cases} \quad (7)$$

记

$$\Omega = \{x \in \mathbb{R}^{2+n}; \phi = 0\}, \quad (8)$$

$$\Omega_1 = \{x \in \mathbb{R}^{2+n}; J_i(q)B^{-1}(q)J_i^T(q) \neq 0, x \in \Omega\}. \quad (9)$$

则给出下面的定理:

定理 1 假设系统 (7) 在域 Ω_1 上, 允许控制输入 $u(t) \in U, t \in [t_0, t_1]$. 如果对 $t \in [0, t_1]$ 有且仅有

$$\Psi(x(0)) = 0, \quad L_f \Psi(x(0)) = 0, \quad (10)$$

则当 $t \in [0, t_1], \phi = 0$ 时可实现 $\lambda - \phi$ 映射的逆转, 且有:

$$\lambda(t) = -(L_{\tilde{h}} L_f \Psi(x))^{-1} (L_{\tilde{f}}^2 \Psi(x) + L_{\tilde{g}} L_f \Psi(x)u) = F_1(x) + F_2(x)u. \quad (11)$$

证 利用李导数概念, 沿着 (7) 对 ϕ 求导

$$\begin{aligned} \dot{\phi} &= \frac{\partial \Psi}{\partial x} \dot{x} = L_f \Psi(x) + L_{\tilde{g}} \Psi(x)u + L_{\tilde{h}} \Psi(x)\lambda, \\ L_{\tilde{f}} \Psi(x) &= 0, \quad L_{\tilde{h}} \Psi(x) = 0, \\ \ddot{\phi} &= \frac{\partial [L_f \Psi(x)]}{\partial x} \dot{x} = L_f^2 \Psi(x) + L_{\tilde{g}} L_f \Psi(x)u + L_{\tilde{h}} L_f \Psi(x)\lambda. \end{aligned} \quad (12)$$

ϕ 在域 Ω_1 上的相关度为 2, 则系统(7)和(12)是可逆的. 证毕.

把(11)代入(7)可得:

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u, \quad (13)$$

选择刻划终端操作器的运动坐标和相互作用力为输出方程:

$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R(x) \\ F_1(x) + F_2(x)u \end{bmatrix} := h(x) = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix}, \quad (14)$$

则方程(13), (14)构成一仿射非线性系统.

3.2 非线性反馈和变结构控制

沿着系统(13)对 y 微分, 可得

$$\begin{bmatrix} \dot{y}_1 \\ \dot{y}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_f R(x) \\ F_1(x) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_g L_f R(x) \\ F_2(x) \end{bmatrix} u := M(x) + N(x)u. \quad (15)$$

如文献[9]中的假设:

假设 3 假设对函数 $y_1 = R(x)$, 存在一子流形 $\Omega_2 \subset \Omega_1$, 使 $N(x)$ 对每个 $x \in \Omega_2$ 都是非奇异的.

y 的相关度为 $2+0=2$, 据假设 3, 则系统(15)是可逆的, 可利用非线性反馈来线性解耦.

选择一控制律为:

$$u = N^{-1}(-M + \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix}), \quad (16)$$

则得线性解耦输出为:

$$\dot{y} = v, \quad (17A)$$

$$y_2 = v_2. \quad (17B)$$

子系统(17A)是由忽略了未建模动力学的受限柔性机器人方程(5)导出的, 但不确定性不可避免地存在于实际系统中, 若考虑到系统的不确定性, 则(17A)不能取严格等号, 若用 ϵ 来表征不确定性而引起的子系统的摄动, 则可表为:

$$\dot{y}_1 = v_1 + \epsilon. \quad (18)$$

假设 4 假定 ϵ 与 \dot{y}_1 和 y_1 有关, 且可表示为:

$$\epsilon = -\xi_2 \dot{y}_1 - \xi_1 y_1 + \xi_0, \quad (19)$$

其中, ξ_2, ξ_1, ξ_0 为不确定系数, 并假定它们是有界的, 即

$$\alpha_i \leq \xi_i \leq \beta_i, \quad i = 1, 2; \quad |\xi_0| \leq \gamma.$$

对(18)选取

$$v_1 = -f_2 \dot{y}_1 - f_1 y_1 + \bar{v}_1, \quad f_1, f_2 > 0. \quad (20)$$

由(18), (19), (20)可得

$$\dot{y}_1 = -(f_2 + \xi_2) \dot{y}_1 - (f_1 + \xi_1) y_1 + (\bar{v}_1 + \xi_0). \quad (21)$$

为了提高系统内部参数摄动和抗外部干扰的鲁棒性, 对(21)设计变结构补偿器.

令

$$e = [e_1 \quad e_2]^T = [y_1 - y_1^d, \dot{y}_1 - \dot{y}_1^d]^T,$$

其中 y_1^d 为期望输出.

定义滑动曲面为

$$s = e_2 + \Lambda_1 e_1, \quad (22)$$

其中

$$\Lambda_1 > 0, \quad e_1(0) = 0, \quad e_2(0) = 0.$$

由(21)

$$\begin{aligned} \dot{s} &= \ddot{y}_1 - \ddot{y}_1^d + \Lambda_1 \dot{e}_1 \\ &= -(f_2 + \xi_2)\dot{y}_1 - (f_1 + \xi_1)y_1 + \Lambda_1 \dot{e}_1 - \ddot{y}_1^d + (\bar{v}_1 + \xi_0). \end{aligned} \quad (23)$$

取变结构控制律为:

$$\bar{v}_1 = \sum_{i=1}^2 H_i y_1^{(i-1)} + K_1 \dot{e}_1 - L_1 \text{sgn}(s), \quad (24)$$

其中, $\text{sgn}(s)$ 为符号函数, H_i, K_1, L_1 为待定量.

则我们给出如下定理:

定理 2 对闭环系统(21), 给定的光滑期望轨迹 y_1^d , 且 $|\ddot{y}_1^d| \leq C$, 若采用控制律(24), 适当选取系数阵 H_i, K_1, L_1 , 则滑动面 s 可在有限时间趋近于 0, 并保持为 0. 即当 $t \rightarrow \infty$ 时, $y_1 \rightarrow y_1^d$.

证 选择 H_i, K_1, L_1 如下:

$$H_i \leq f_i + \alpha_i, \quad y_1^{(i-1)} s > 0, \quad (25)$$

$$H_i \geq f_i + \beta_i, \quad y_1^{(i-1)} s < 0, \quad (26)$$

$$K_1 \leq -\Lambda_1, \quad \dot{e}_1 s > 0, \quad (27)$$

$$K_1 \geq -\Lambda_1, \quad \dot{e}_1 s < 0, \quad (28)$$

$$L_1 > C + \gamma. \quad (29)$$

则

$$s\dot{s} \leq -(L_1 - C - \gamma)|s|.$$

当 $s \neq 0$ 时

$$s\dot{s} < 0 \quad (30)$$

由(22), (30) 可得, 当 $t \rightarrow \infty$ 时, $s \rightarrow 0$. 即 $t \rightarrow \infty$ 时, $y_1 \rightarrow y_1^d$. 证毕.

对子系统(17B), 选取

$$v_2 = y_2^d - \mu \int_0^t (y_2 - y_2^d) dt, \quad (31)$$

其中 y_2^d 为期望输出.

给出如下定理:

定理 3 对闭环系统(17B), 若取控制律(31), 则 $\mu > 0$ 时, $t \rightarrow \infty$ 时, $y_2 \rightarrow y_2^d$.

证 将(31)代入(17B)得:

$$y_2 - y_2^d + \mu \int_0^t (y_2 - y_2^d) dt = 0. \quad (32)$$

则当 $\mu > 0$ 时, (32) 式可满足 $t \rightarrow \infty$ 时, $y_2 \rightarrow y_2^d$. 证毕.

4 仿真结果

本文以具有柔性前臂的两连杆柔性机器人为例对所提方案进行了仿真. 在仿真中, 取约束刚性面为一垂直面: $X = a$, 其中, $a = 0.6$.

机器人的模型及具体参数取自[10].

取期望位置轨迹为: $y_d = 0.007t + 0.5$, $t \in [0, 10]$.

取期望约束力为: $\lambda_d = 5\text{N}$.

则控制器使终端操作器在保持期望约束力的条件下沿着期望位置轨迹以 0.007m/s 的速度在约束面上运动. 设初始位置为 0.4m ; 初始速度为零.

仿真结果如图 2 和图 3 所示, 其中图 2 为终端操作器的位置跟踪曲线; 图 3 为约束力曲线(注: 图中虚线为期望轨迹). 由位置跟踪曲线图中可见. 即使初始位置误差达 0.1m , 在控制器

的作用下仍能快速跟踪期望轨迹. 达到所需要的精度, 具有一定的鲁棒性. 约束力曲线也说明了控制效果较好. 因此仿真结果表明本章所提的力/位置控制器能同时进行力/位置控制, 并使位置跟踪和约束力控制达到良好的控制效果, 且具有一定的鲁棒性.

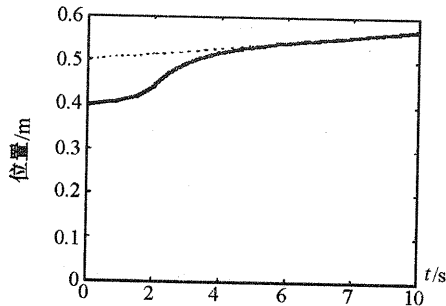


图2 位置跟踪曲线

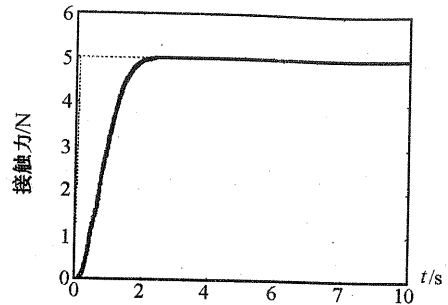


图3 约束力跟踪曲线

5 结束语

本文提出了一种新的受限柔性机器人力/位置控制方案. 根据微分几何理论, 将含有约束力 λ 的非线性方程转化为不含 λ 的仿射非线性形式, 再选取刻划终端操作器运动的笛卡尔坐标和约束力作为输出, 然后利用非线性反馈实现系统输出线性化, 最后对子系统设计了变结构控制器, 并从理论上证明了柔性机器人的运动轨迹和约束力分别收敛于期望的轨迹和期望的约束力, 从而实现了同时对力/位置进行控制, 而且闭环控制系统具有一定的鲁棒性. 为了证实所提方案的可行性, 我们对此方案进行了仿真, 仿真结果表明本方案可实现力/位置控制, 且使闭环控制系统具有一定的鲁棒性.

参 考 文 献

- 1 De Luca, A., Lucibello, P. and Ulivi, G.. Inversion techniques for trajectory control of flexible robot arms. *J. Robot Systems*, 1989, 6(4): 325-344
- 2 Bayo, E., Papadopoulos, P., Stubbe, J. and Sema, M.. Inverse dynamics and kinematics of multi-link elastic Robots; A Iterative Frequency Domain Approach. *Int. J. Robotics Research*, 1989, 8(6): 49-62
- 3 Nathan, P. J. and N., S.. Sliding mode control and elastic mode stabilization of a robotic arm with flexible links, *ASM Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, 1991, 113(4): 669-676
- 4 McClamroch, N. H.. Feedback stabilization of control systems described by a class of nonlinear differential-algebraic equations. *Systems and Control Letters* 1990, 15(1): 53-60
- 5 Whitney, D. E.. Historical perspective and state of art in robot force control. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Fort Lauderdale, 1985, 262
- 6 Hogan N.. Impedance Control: An Approach to Manipulator, Part I, II, and III. *ASME J. Dynamic Systems, Measurement and Control*, 1985, (3): 1-16
- 7 Raibert, M. H. and Craig, J. J.. Hybrid Position/Force Control of Manipulators. *ASME J. Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 1981, 102(7): 126-133
- 8 Jae Young Lew and Book, Wayne J.. Hybrid control of flexible manipulators with multiple contact. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1993, 242-247
- 9 Woosoon Yim, Singh, Sahjendra N.. Inverse force/end-point control, zero dynamics and stabilization of constrained elastic robots, *American Control Conference*, 1993, (7): 2873-2877
- 10 De Luca, A., Lannari, L., Lucibello, P., Panzieri, S. and Ulivi G.. Control experiments on a two-link robot with a flexible forearm. *Proc. of the 29th Conference on Decision and Control*, Honolulu, USA, 1990, 520-527

Robust Force/Position Control of a Kind of Constrained Flexible Robots

XU Jianmin, ZHU Beibei and ZHOU Qijie

(Department of Automatic Control Engineering, South China University of Technology • Guangzhou, 510641, PRC)

Abstract: This paper addresses robust force/position control of a kind of constrained flexible robots. First, a nonlinear dynamic model of the constrained flexible robot is derived and is transformed to affine nonlinear system by using differential geometry theory. Then the system is linearized by using nonlinear feedback method. At last, a variable structure control law is designed for the subsystem which can ensure the robustness of the system.

Key words: constrained flexible robots; nonlinear feedback; variable structure control

本文作者简介

徐建闽 见本刊 1998 年第 1 期第 151 页.

朱蓓蓓 见本刊 1998 年第 3 期第 472 页.

周其节 见本刊 1998 年第 1 期第 38 页.

“何潘清漪优秀论文奖”征文启事

“何潘清漪优秀论文奖”征文 1998 年继续由本刊办理, 请应征作者注意:

1. 文章必须是用中文正式发表过的. 因此, 寄来的文章应是该文在所发表的刊物的抽印页或复印页.
2. 文章需一式五份.
3. 请在应征稿的首页左上方注明“何潘清漪优秀论文奖征文”字样.

《控制理论与应用》编辑部

美国哈佛大学教授何毓琦(Y. C. Ho)先生为了庆贺其母亲何潘清漪老太太九十岁生日特设此奖, 借以纪念她的母爱, 以及她为了支持何先生的事业所付出的辛劳.

授奖对象:

离散事件动态系统(DEDS)方面优秀中文论文的作者.

目的:

选拔、奖励、促进和宣扬中国在 DEDS 领域内得到国际承认的重大成果.

条例与机构:

1. 由何毓琦先生提供的何潘清漪奖金总额为 5000 美元, 每次授奖金额 1000 美元, 连续颁发 5 次(每两次之间间隔至少为一年). 5 次之后, 有可能追加基金继续颁发.
2. 世界各地用中文发表的关于 DEDS 方面的论文都有资格申请奖金.
3. 论文由国际专家小组甄别和最终评定.

专家小组成员: 曹希仁、陈翰馥、李伯天、谈自忠(组长)、饶大维、郑应平.

4. 如果某年度无合适的论文, 该奖可以不颁发, 但至少会颁发 5 次.

5. 1998 年截稿日期为 1998 年 12 月 31 日, 授奖时间另行通知, 申请者可将论文寄到《控制理论与应用》编辑部(地址: 广州市 五山 华南理工大学 邮政编码: 510641).

6. 鼓励获奖者将其论文译成英文, 为其发表提供帮助, 借此促进在 DEDS 领域内工作的中国研究人员的国际合作.