

柔性机械臂试探前行的碰撞响应控制策略

党进¹, 倪风雷¹, 刘业超¹, 刘宏^{1,2}

(1. 哈尔滨工业大学机器人技术与系统国家重点实验室, 150001, 哈尔滨;
2. 德国宇航中心机器人与机电一体化研究所, 82230, 慕尼黑)

摘要: 针对柔性机械臂在碰撞过程中的安全问题, 仿照人类在黑暗环境中摸索前进的行为提出了一种试探前行的安全碰撞响应控制策略. 控制器采用变刚度阻抗控制策略, 先根据碰撞对象来调节系统刚度, 以实现与被撞对象的软接触, 然后控制器以当前位置为起点进行试探运动, 若通过上一次碰撞点且无碰撞发生时, 控制器恢复高刚度阻抗控制方式, 以较高的精度到达目标位置. 为了验证提出的控制策略, 在4自由度机械臂上进行了碰撞试验, 结果表明, 该控制策略在无碰撞时具有良好的位置跟踪性能, 在发生碰撞时能够有效地保护机械臂本体及被撞对象, 从而克服了传统控制策略在碰撞时中止任务的缺点. 因此, 提出的控制策略是有效可行的.

关键词: 机械臂; 碰撞; 响应策略; 阻抗控制

中图分类号: TP24 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2011)09-0021-07

Collision Reaction Control Strategy for Tentative Moving of Flexible Manipulator

DANG Jin¹, NI Fenglei¹, LIU Yechao¹, LIU Hong^{1,2}

(1. State Key Laboratory for Robotics and System, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;
2. Institute of Robotics and Mechatronics, German Aerospace Center, Munich 82230, Germany)

Abstract: Focusing on the safety in the collision process between the manipulator and the environment, a safe collision reaction control strategy for tentative moving is proposed by imitating human groping behavior in dark environment. The manipulator is controlled in the impedance control mode with variable stiffness. Contacting with the environment, the controller adjusts its stiffness to realize soft-touch according to the environment stiffness, then the controller utilizes the current position as the starting point for small range trajectory planning and gropes. If the groping movement can pass through the last collision position and no collision occurs again, the controller resumes its high stiffness impedance control mode and eventually reaches the target position accurately. For validating the proposed reaction control strategy, some collision experiments are implemented on the platform of HIT 4 degrees of freedom manipulator. The experiment results show that the proposed controller is endowed with good position tracking accuracy in the absence of colliding, and protects the manipulator and the contact object effectively in collision cases. The reaction control strategy enables to overcome the shortcoming of terminating task once a collision occurs in the conventional controller.

Keywords: manipulator; collision; reaction strategy; impedance control

随着机器人应用范围的扩大,从工业环境到家庭服务、医疗以及太空探索等,机器人将越来越多地工作在未知环境中,但未知环境中的人、环境和机器人本体的安全问题则是研究的主要问题^[1-2]. 机器人与环境的接触碰撞可分为碰撞前、碰撞和碰撞后阶段. 碰撞前的自由运动要求高位置精度,碰撞发生时需要对碰撞事件进行快速和准确地检测,检测到碰撞后,机器人控制系统需要采取有效的控制策略来保护机器人及碰撞物体. 很多学者做了大量的碰撞前避碰的研究工作^[3-6],然而,要在未知环境中避碰却不是一件容易的事情. 因此,在发生碰撞事件时,控制器应采取积极有效的策略来控制机器人,使其脱离危险环境,以保护机器人及接触物体,传统的控制策略有机械臂立即制动方式^[7]、切换控制模式^[8]以及阻抗控制方式^[9-10]等. 立即制动方式是指检测到碰撞事件后机械臂制动,虽然机械臂停止运动,但其仍然停留在危险区域,未能完全脱离危险. 切换控制模式是指由碰撞前的位置控制模式切换到碰撞后的力矩控制模式,这种切换容易造成系统的不稳定. 阻抗控制方式是当机械臂与物体发生接触时,机械臂虽然能表现出柔顺性,对物体有一定的保护作用,可以延长接触力达到危险阈值的时间,但这对于无知觉或者不能移动的环境对象来说意义则不大. 这些研究存在的共同特点是检测到碰撞后,机器人所执行的任务会中止. 目前,国内关于碰撞的研究集中在避碰轨迹规划^[11-13]和碰撞动力学方面^[14-15],而在碰撞后响应控制方面的研究较少. 赵玉立等人^[16]将撞击作为一种扰动,在 H_∞ 控制理论框架下建立了简单柔性撞击系统的控制模型,但该方法对于持续性的碰撞或者大碰撞力时并不合适.

本文模仿人类在黑暗环境中摸索前进的行为,提出了一种试探前行的安全碰撞响应控制策略,并在实验室自主研发的卫星在轨自维护四自由度机械臂地面实验原理样机上进行了实验,并且验证了本文提出的碰撞响应控制策略.

1 柔性机械臂动力学

机器人的柔性主要集中于关节处,并将连杆视为刚性杆. 利用 Spong 的假设^[17],可以将柔性关节简化成一个如图 1 所示的线性弹簧,其模型表达式为

$$\left. \begin{aligned} M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) &= \tau_j \\ \tau_m &= J\ddot{\theta} + \tau_j + \tau_F \\ \tau_j &= K(\theta - q) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: J 、 M 、 K 分别表示电机惯量矩阵、关节惯量矩阵和关节的刚度矩阵; C 表示哥氏力; g 表示重力项矩阵; θ 、 q 分别表示电机端和关节端的角位置; τ_m 为电机控制力矩向量; τ_j 为关节的输入力矩向量; τ_F 为摩擦项向量.

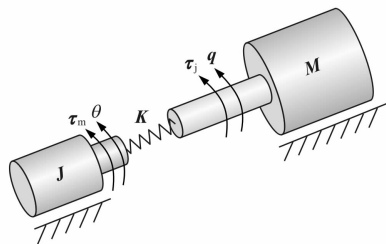


图1 柔性关节简化模型

$M(q)$ 正定对称, $\dot{M}(q) - 2C(q, \dot{q})$ 为反对称矩阵, 即

$$\dot{M}(q) = C(q, \dot{q}) + C^T(q, \dot{q}) \quad (2)$$

由式(1)、式(2)可得系统的总动量

$$p = M(q)\dot{q} \quad (3)$$

当发生碰撞时, 机器人所受到的外界力 f_c 和力矩 m_c 为

$$F_c = \begin{bmatrix} f_c \\ m_c \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^6 \quad (4)$$

碰撞时机器人的动力学方程可变换为

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) = \tau_j + \tau_c \quad (5)$$

系统总动量对时间的导数为

$$\dot{p} = \tau_j + \tau_c + C^T(q, \dot{q})\dot{q} - g(q) \quad (6)$$

碰撞产生的关节力矩

$$\tau_c = J_c^T(q)F_c \quad (7)$$

2 碰撞检测

假设在 t 时刻检测到碰撞事件, 则从碰撞发生前的 t_0 时刻到检测到碰撞发生的 t 时刻, 系统总动量的改变量可通过下式计算

$$\Delta p = p(t) - p(0) = \int_{t_0}^t (\tau_j + \tau_c + C^T(q, \dot{q})\dot{q} - g(q)) dt \quad (8)$$

定义碰撞检测函数^[18]

$$R(t) = \lambda(p(t) - \int_{t_0}^t (\tau_j + C^T(q, \dot{q})\dot{q} - g(q) + R) dt - p(t_0)) \quad (9)$$

在初始状态, 即碰撞前 $R(t_0) = 0$, 系数 λ 正常, $p(t)$ 为 t 时刻系统的动量, $p(t_0)$ 为系统碰撞前的动量. 对式(9)微分, 可得

$$\dot{R} = \lambda[\dot{p}(t) - \dot{q}^T \tau_j - C^T(q, \dot{q})\dot{q} + g(q)] - \lambda R \quad (10)$$

根据式(6)、式(10)可得

$$\dot{\mathbf{R}} = \lambda \boldsymbol{\tau}_c - \lambda \mathbf{R}$$

(11)

当碰撞发生或者消失时,由于 λ 的作用, $\mathbf{R}$ 随着 $\boldsymbol{\tau}_c$ 的增大而成指数增大,随着 $\boldsymbol{\tau}_c$ 的减小指数收敛到0.实际应用时,适当选取阈值 $\mathbf{R}_c$,当 $|\mathbf{R}| < \mathbf{R}_c$ 时,认为无碰撞事件发生;反之,碰撞发生.

3 碰撞响应控制策略

在未知环境下,机械臂随时都有可能与环境发生接触.在机器人检测到碰撞发生时,机器人控制系统应迅速采用一种有效的控制策略来降低危险或者潜在的危险性.传统的响应控制策略有:①机械臂立刻制动;②机械臂立刻弹开;③切换控制模式,即将接触方向的位置控制切换为纯力矩控制模式或0力矩控制模式;④阻抗控制方法.

第①种策略适用于静态环境下机械臂处于主动接触状态,当机械臂被动接触时,机械臂制动后仍然紧贴碰撞物体,并没有完全脱离危险.第③种策略的单纯力矩存在较大的噪声,直接控制容易引起机械臂的抖动,而控制模式的切换也可能使系统不稳定.若采用阻抗控制,控制器的柔顺作用使得机器人与碰撞物体之间达到危险碰撞的时间延长,若碰撞对象是人,这种延长是有意义的,但若碰撞的是无法移动的残疾人或是没有感觉的物体时,在达到危险阈值时,机器人仍然会由于位置控制的作用而继续运动,因此会产生损伤.这4种响应策略存在的共同特点是碰撞后机器人所执行的任务中止.除了传统的响应控制策略之外,Bicchi等人^[19-20]研究了具有视觉、触觉传感器等的机器人与人协调作业时调整刚度的控制策略,Haddadin等人^[21]研究了人机交互时实时调整期望轨迹的响应策略.

本文设计了一种试探前行的碰撞响应控制策略:在自由空间运动时,机器人以较高刚度的阻抗控制跟踪期望轨迹;当检测到有外力时,机器人会适时调整阻抗控制的刚度(使机械臂变软),直到检测到碰撞事件时,控制器的刚度调整到较低水平,机械臂脱离当前的危险环境并进入安全等待状态.在这种低刚度条件下,机器人末端在很小力的作用下即可被任意移动,当外力移除时,机器人末端可稳定保持在当前新的位置上,实现类似于零力的控制效果.在安全等待的这段时间内若无碰撞发生,机器人便开始以较低刚度的阻抗控制模式柔顺试探前行(以当前位置为起点小范围轨迹规划、试探前行).若试探前行能通过前一个碰撞点且未检测到碰撞事件,机

器人就会恢复到最初的高刚度阻抗控制模式,并最终较高的精度到达目标位置.该碰撞响应控制策略具体执行时的流程如图2所示.

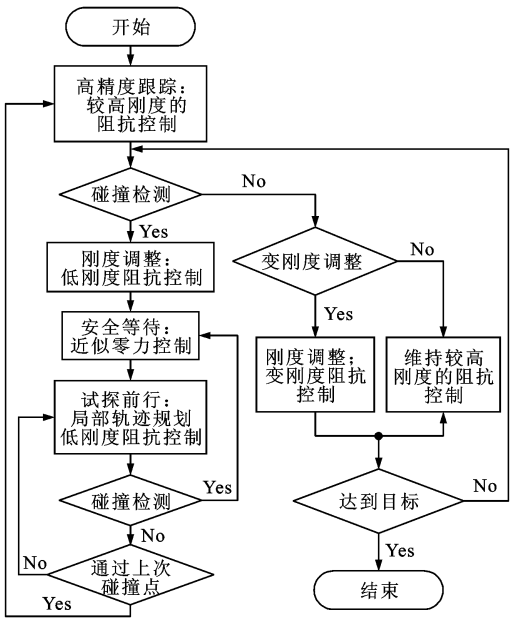


图2 碰撞响应控制策略流程图

4 实验

4.1 实验平台

如图3所示,关节结构采用模块化设计,最大限度地减少了关节结构的差异,增强了关节之间的互换性.关节采用永磁同步电机驱动,通过谐波减速器进行扭矩传递,减速比为160,运动学参数见表1.电机端和关节末端分别安装有旋转变压器和电位计,分别用于测量电机端和关节端的位置.另外,机械臂的每个关节都安装有扭矩传感器.

表1 HIT四自由度关节机器人参数

参数	连杆1	连杆2	连杆3	连杆4
d_1/mm	0	530	390	225
$\alpha_i/(\text{^\circ})$	-90	0	0	0
d_2/mm	0	0	0	0
$\theta_i/(\text{^\circ})$	0	0	0	12
m/kg	4.229	7.73	6.64	4.02
$\mathbf{J}/\text{kg}\cdot\text{m}^2$	1.857	1.857	0.15	0.15
$\mathbf{K}/(\text{N}\cdot\text{m})\cdot\text{rad}^{-1}$	72.154	72.154	58.128	58.128

$d_1: z_i$ 到 z_{i+1} 沿 x_i 测量的距离; $\alpha_i: z_i$ 到 z_{i+1} 绕 x_i 旋转的角度; $d_2: x_{i-1}$ 到 x_i 沿 z_i 测量的距离; $\theta_i: x_{i-1}$ 到 x_i 沿 z_i 旋转的角度; m : 连杆质量.

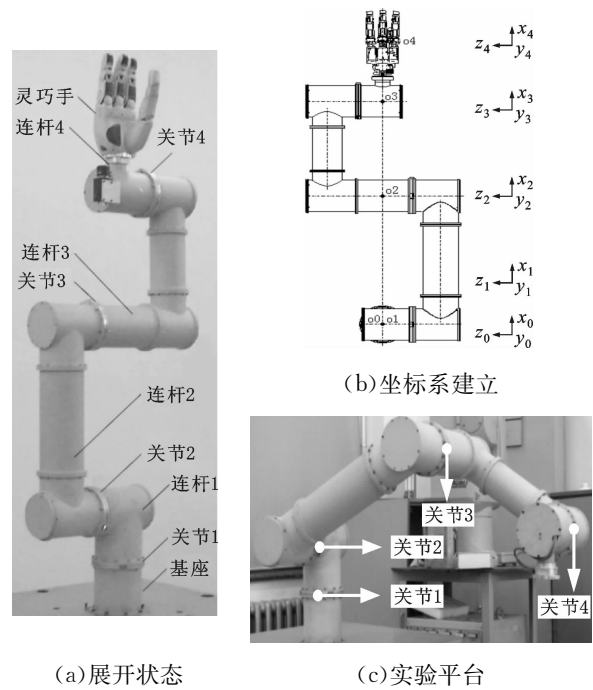


图 3 HIT 四自由度柔性机械臂

为了提高控制性能,机器人控制采用数字信号处理器和现场可编程门阵列(DSP 和 FPGA)的硬件结构(见图 4),各关节层的信号处理、电机驱动及控制部分由 FPGA 完成,机器人的上层控制算法在 DSP 下完成。DSP 与 FPGA 间采用自主研发的高速串行通信方式(MLVDS),通信速率高达 5 kHz,从而保证了控制算法的实时性。

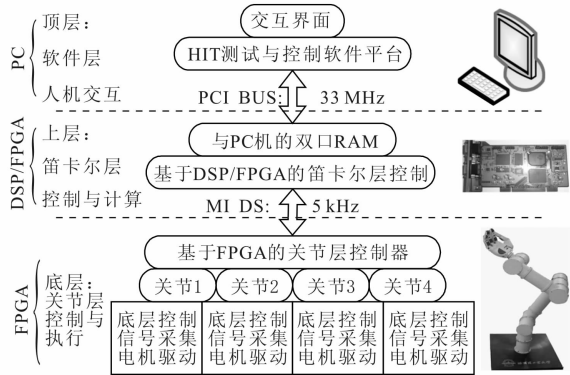


图 4 机械臂控制器硬件结构

4.2 实验结果

将机械臂与固定物体的碰撞实验简称为实验 1,该实验用于检验本文提出的碰撞响应策略在机械臂与固定物体发生碰撞时的效果。实验中机械臂的姿态如图 3c 所示,基关节(即关节 1)以 $2(^{\circ})/s$ 的速度跟踪期望轨迹,其他关节的位置不变。在机械臂的

运行空间里安装一个障碍物,然后分别采用 3 种不同的碰撞响应策略进行对比实验。这 3 种响应策略分别为:由比例微分(PD)控制检测到机械臂与障碍物发生碰撞后立即采用的制动方式;传统阻抗控制检测到机械臂与障碍物发生碰撞后立即采用的制动方式;本文提出的碰撞响应策略。实验中,碰撞检测的阈值设定为 $3\text{ N}\cdot\text{m}$ 。

如图 5 所示,从图 5c、5d 中可以看出,采用传统的 PD 控制时,位置跟踪精度较高,但从机械臂与障碍物发生接触的时刻开始,跟踪误差迅速增大,控制器为了跟踪期望轨迹而不断增加输出控制量,机械臂与碰撞物体之间的接触力也随之迅速增加,并在 7.26 s 时最先检测到碰撞事件控制器的输出为 0,因此机械臂迅速停止。此时,虽然机械臂停止运动,但机械臂紧靠障碍物,仍然会受到相对较大的外力,如图 5e、5f 所示。采用阻抗控制时,由于控制器的柔顺作用,使得机器人与碰撞物体之间达到碰撞阈值的时间较 PD 控制方式有所延长,如图 5a、5e 所示。因此,控制器的位置误差一直在增大,机械臂仍然需要继续跟踪期望轨迹,这样就导致了机械臂与障碍物之间的接触力逐渐增大,并在 7.34 s 时检测到碰撞事件,此时控制器的输出为 0,而且机械臂的制动效果和 PD 控制立即停止的效果相当,如图 5e、5f 所示。另外,从图 5c 中可以看出,由阻抗控制的位置跟踪精度比较低,因此不适用于位置跟踪精度要求较高的场合。从图 5a 可以看出,采用本文提出的碰撞响应策略在无碰撞发生时,机械臂处于刚度较高的阻抗控制状态,因此跟踪精度较高。在发生接触检测到碰撞事件的整个过程中,控制器将根据环境适时地调节系统的刚度,实现柔顺接触。在 7.39 s 检测到碰撞事件后,机器人进入刚度较低的安全等待状态,此时机械臂末端在很小的力作用下即可被任意移动。当无外力作用时,机器人末端可稳定保持在当前的新位置上,从而实现了类似于零力的控制效果。

实验 1 的结果表明,采用 PD 控制立即停止策略的跟踪精度较高,但其碰撞最为剧烈且制动后机械臂仍然停留在危险环境,未完全脱离危险。采用阻抗控制并在检测到碰撞时立即制动的策略时,由于阻抗控制的柔顺作用,使机械臂到达危险阈值的时间有所推迟,但其跟踪精度低,且对于不可移动的环境物体时,“延迟危险阈值”的意义不大。采用本文提出的响应策略在自由空间运动时,机械臂具有较高的位置跟踪精度,在接触到障碍物时控制器能够适时调节刚度,并在检测到碰撞事件后进入一种低刚

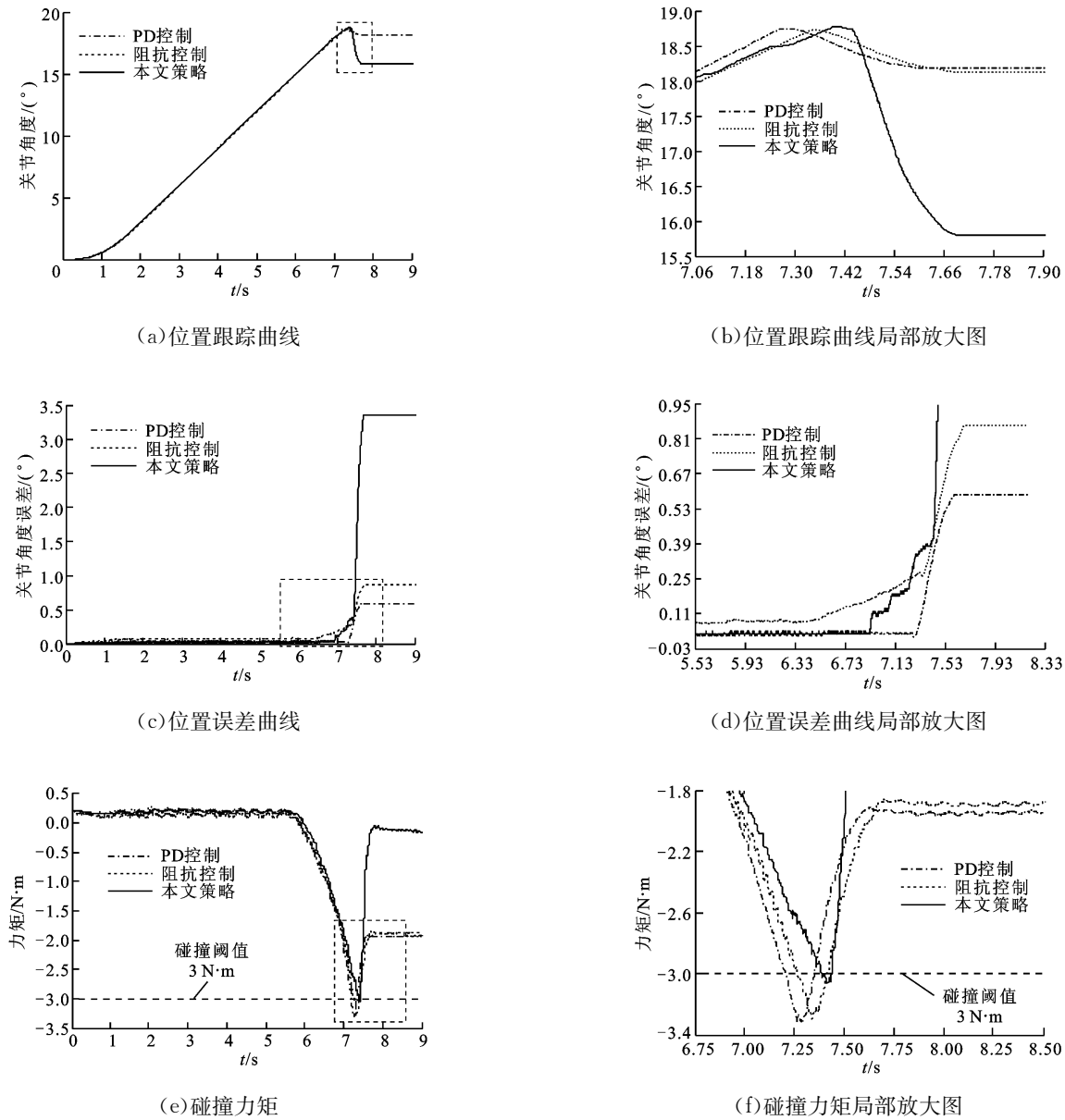


图 5 机械臂与固定物体的碰撞实验曲线

度的安全等待状态,因此机械臂操作时的柔顺性和安全性均得到了提高。

如图 6 所示,将机械臂与可移除障碍物的碰撞实验简称为实验 2。机械臂的姿态如图 3c 所示,基关节跟踪如图 6a 所示的期望轨迹,在运行空间施放一个可移除的障碍物,碰撞检测阈值为 $3\text{ N}\cdot\text{m}$ 。根据图 6b,实验过程可分为 6 个阶段:①起始阶段($0\sim13.8\text{ s}$)机械臂在自由空间运动,在 11.8 s 时,力矩传感器的读数逐渐变小,即可能有接触发生,此时控制器适时地调节系统的刚度,机械臂的跟踪误差增大,机械臂与物体之间实现软接触;②控制器在 13.8 s 时,检测到碰撞事件发生,控制器进入安全等待状态;③在 $19.98\sim23.35\text{ s}$ 时,停留一段时间后,

机械臂未检测到新的碰撞事件,然后控制器以当前位置作为期望轨迹的起点进行小范围的轨迹规划(见图 6b),并且以低刚度阻抗控制模式试探运动;④在 $23.35\sim29.47\text{ s}$ 时,在碰撞点位置(38.04°)再次检测到碰撞事件,机械臂再次进入安全等待模式;⑤在 $29.47\sim36.52\text{ s}$ 时,机械臂再次以当前位置作为起点进行小范围轨迹规划、低刚度试探前行,机械臂通过碰撞点位置(38.04°),并且没有检测到碰撞事件,说明障碍物已经移除;⑥在 36.52 s 时,机械臂直接到达目标位置,在该阶段,控制器判定障碍物已经不存在,从而恢复初始状态,并以当前位置为起点过度到最初的轨迹上,最终高精度地到达目标位置。

实验结果表明,采用本文提出的碰撞响应策略,机械臂可根据外界环境适当调节控制器的刚度,使得机械臂与环境之间实现软接触,并在检测到碰撞

事件后进入安全等待状态,然后机械臂以当前位置为期望轨迹的起点进行小范围轨迹规划、试探运动,若试探运动通过上一次碰撞点并且无碰撞事件发生时,机械臂恢复高刚度阻抗控制模式,并沿原来的轨迹跟踪到目标位置. 因此,碰撞响应策略有效可行,且不需要终止任务.

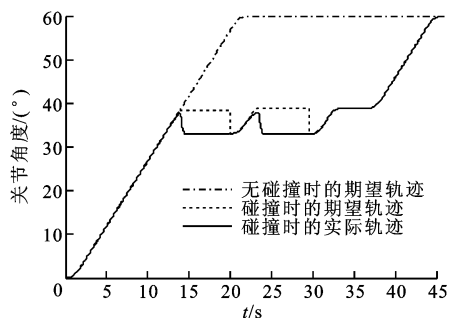
5 结 论

机械臂在未知环境中运动时,机械臂本体和接触环境的安全性是需要考虑的首要问题,为此,本文模仿人类在黑暗中摸索前进的行为提出了一种试探前行的柔性机械臂碰撞响应控制策略. 机械臂在自由空间运动时,以较高刚度的阻抗控制模式跟踪期望轨迹,位置跟踪精度较高. 在机械臂与障碍物发生接触后,控制器可根据外界环境适当调节其刚度,使机械臂与障碍物之间实现软接触,并在检测到碰撞事件后进入安全等待停留状态. 随后,机械臂以当前位置为期望轨迹的起点进行小范围轨迹规划、试探前行,若试探运动能通过上一次碰撞点且无碰撞事件发生时,机械臂恢复高刚度阻抗控制模式,并最终到达目标位置.

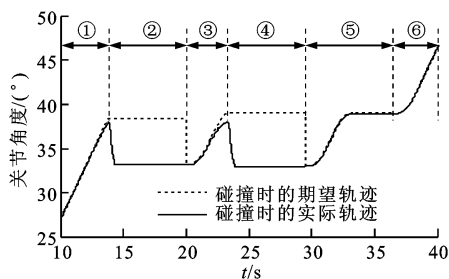
本文以四自由度自维护机械臂为实验平台进行了与固定障碍物和可移除障碍物的碰撞实验,实验结果表明,本文提出的碰撞响应策略在无碰撞发生时,控制器具有良好的位置跟踪精度,在发生碰撞时能够有效地保护机械臂的安全,控制策略有效可行且不需要中止任务,因此具有良好的应用价值.

参考文献:

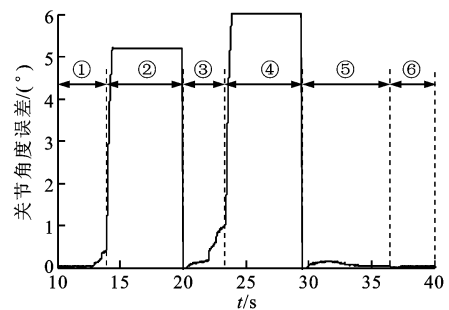
- [1] HEINZMANN J, ZELINSKY A. Quantitative safety guarantees for physical human-robot interaction[J]. International Journal of Robotics Research, 2003, 22(7): 479-504.
- [2] BICCHI A, TONIETTI G. Fast and “soft-arm” tactics: dealing with the safety-performance tradeoff in robot arms design and control [J]. IEEE Robotics & Automation Magazine, 2004, 11(2): 22-33.
- [3] KHATIB O. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots [J]. International Journal of Robotics Research, 1985, 5(1): 500-505.
- [4] LUMELSKY V, CHEUNG E. Real-time collision avoidance in teleoperated whole-sensitive robot arm manipulator [J]. IEEE Trans on Systems Man and Cybernetics, 1993, 23(1): 194-203.
- [5] JIMENEZ P, THOMAS F, TORRAS C. Robot mo-



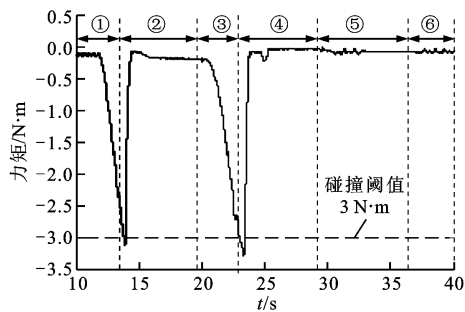
(a)位置跟踪曲线



(b)试探运动时的位置跟踪曲线



(c)位置误差曲线



(d)力矩传感器信号

- ①:检测到碰撞后,变刚度实现软接触;②:安全等待;③:小范围轨迹规划,低刚度试探前行;④:检测到碰撞,并再次进入安全等待;⑤:小范围轨迹规划,低刚度试探前行,通过上次的碰撞点;⑥:恢复刚度,精确到达目标位置

图6 机械臂与可移除物体的碰撞实验曲线

- tion planning and control [M]. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 1998: 305-343.
- [6] YOSHIKAZU A, TERUO F, HAJIME A. Collision avoidance in multi-robot systems based on multi-layered reinforcement learning [J]. Robotics and Autonomous Systems, 1999, 29(1): 21-32.
- [7] YAMADA Y, HIRASAWA Y, HUANG S. Human-robot contact in the safeguarding space [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 1997, 2(4): 230-236.
- [8] TZYH-JONG T, WU Yunying, NING Xi. Force regulation and contact transition control [J]. IEEE Control Systems, 1996, 16(1): 32-40.
- [9] HUANG Jianbin, XIE Zongwu, JIN Minghe. Adaptive impedance-controlled manipulator based on collision detection [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2009, 22(1): 105-112.
- [10] HOGAN N. Stable execution of contact tasks using impedance control [C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1987: 1047-1054.
- [11] 朱向阳, 钟秉林, 熊有伦. 机器人无碰撞路径规划中的碰撞检测 [J]. 应用科学学报, 1998, 16(1): 700-705. ZHU Xiangyang, ZHONG Binglin, XIONG Youlun. Collision detection between convex polyhedra: a foundation for collision-free path planning [J]. Journal of Applied Sciences, 1998, 16(1): 700-705.
- [12] 张凤, 谈大龙. 一种基于相对坐标系下移动机器人动态实时避碰的新方法 [J]. 机器人, 2003, 25(1): 31-34. ZHANG Feng, TAN Dalong. A new real-time and dynamic collision avoidance method of mobile robots based on relative coordinates [J]. Robot, 2003, 25(1): 31-34.
- [13] 朱齐丹, 仲训昱, 张智. 基于速度变化空间的移动机器人动态避碰规划 [J]. 机器人, 2009, 31(6): 539-547. ZHU Qidan, ZHONG Xunyu, ZHANG Zhi. Dynamic collision-avoidance planning of mobile robot based on velocity change space [J]. Robot, 2009, 31(6): 539-547.
- [14] 刘锦阳, 洪嘉振. 空间伸展机构接触碰撞的动力学分析 [J]. 宇航学报, 1997, 18(3): 14-19. LIU Jinyang, HONG Jiazhen. Dynamic analysis of spacecraft deployable mechanism with contact impact [J]. Journal of Astronautics, 1997, 18(3): 14-19.
- [15] 华卫江, 章定国. 柔性机器人系统碰撞动力学建模 [J]. 机械工程学报, 2007, 43(12): 222-228. HUA Weijiang, ZHANG Dingguo. Modeling of impact dynamics of flexible robots [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(12): 222-228.
- [16] 赵玉立, 邓子辰. 柔性多体撞击系统的精细 H_∞ 控制研究 [J]. 宇航学报, 2003, 24(1): 28-31. ZHAO Yuli, DENG Zichen. The precise H_∞ control research on flexible multi-body impact system [J]. Journal of Astronautics, 2003, 24(1): 28-31.
- [17] SPONG M W. Modeling and control of elastic joint robots [J]. Journal of Dynamic Systems Measurement and Control, 1987, 109(4): 310-319.
- [18] DELUCA A, LORENZO F. Exploiting robot redundancy in collision detection and reaction [C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2008: 3299-3305.
- [19] BICCHI A, TONIETTI G, BAVARO M. Variable stiffness actuators for fast and safe motion control [C]//Proceedings of International Symposium of Robotics Research. Siena, Italy: Springer-Verlag, 2003: 100-110.
- [20] EDSINGER A, KEMP C C. Human-robot interaction for cooperative manipulation: handing objects to one another [C]//The 16th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2007: 1167-1172.
- [21] HADDADIN S, ALBU-SCHAFFER A, DELUCA A. Collision detection and reaction: a contribution to safe physical human-robot interaction [C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2008: 3356-3363.

[本刊相关文献链接]

- 一种前馈补偿和模糊滑模相结合的柔性机械臂控制. 西安交通大学学报, 2011, 45(3): 75-80.
- 大范围视觉伺服方法在空间机器人上的应用. 西安交通大学学报, 2009, 43(1): 85-89.
- 应用部分马尔科夫博弈的网络安全主动响应决策模型. 西安交通大学学报, 2011, 45(4): 18-24.
- 多P2P覆盖网络的带宽分配方法. 西安交通大学学报, 2010, 44(4): 5-8.

(编辑 管咏梅)