

文章编号 1004-924X(2013)07-1795-08

七自由度冗余机械臂避障控制

姜力, 周扬, 孙奎*, 刘宏

(哈尔滨工业大学 机器人技术与系统国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要:基于冗余机械臂零空间的自运动特性,提出了一种新的七自由度冗余机械臂避障控制方法。该方法引入臂平面和避障面来参数化表达冗余机械臂的零空间运动;基于这种描述,利用人工势场法实现碰撞检测;根据检测结果得出的虚拟排斥力推导零空间运动方程,改进具有位置内环的逆动力学控制方法,使机械臂避障时的动态性能具有类似质量-阻尼系统的物理特性。该方法可以在控制末端执行器运动的同时实现冗余机械臂避障。为了验证所提出方法的性能,利用在轨自维护实验平台完成了实验。实验结果表明,机械臂与障碍物的最近距离大于 40 mm,末端执行器位置动态误差小于 10 mm,稳态误差小于 2 mm。这些结果显示,所提出的方法通过合理地自运动行为实现了冗余机械臂的避障控制,而且在避障过程中不影响末端执行器的操作。

关键词:自运动;冗余机械臂;避障;动力学控制

中图分类号:TP242.6 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20132107.1795

Obstacle avoidance control for 7-DOF redundant manipulators

JIANG Li, ZHOU Yang, SUN Kui*, LIU Hong

(State Key Laboratory of Robotics and System,
Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China)

* Corresponding author, E-mail: sunkui@hit.edu.cn

Abstract: A new scheme of obstacle avoidance based on the self-motion of a null space was proposed to control 7-degree-of-freedom(DOF) redundant manipulators. By introducing an arm plane and an obstacle avoidance plane, the representation of the null space motion was parameterized. Based on this formulation, the collisions were detected by the artificial potential field method. With computing virtual repulsion forces, an equation of the null space motion was derived. Then, the inverse dynamics control with an inner position loop was modified to allow the manipulators to show physical meaningful behaviors of a mass-damper system, by which the control of end-effector motion and the obstacle avoidance of manipulator could be achieved at the same time. An experiment on a self-servicing experimental platform was carried out to demonstrate the performance of the proposed scheme. The experimental results show that the closest distance between the manipulator and the obstacle is greater than 40 mm, the dynamic error of the end-effector position is less than 10 mm, and the steady-state error is less than 2 mm. These results indicate that the proposed scheme realizes the obstacle avoidance by proper behaviors of the null space motion, and minimizes the effect on the end-effector during the avoidance.

Key words: self-motion; redundant manipulator; obstacle avoidance; dynamic control

收稿日期:2013-02-26;修订日期:2013-04-12.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51175106)

1 引言

随着当今机器人,特别是仿人机器人的发展,机械臂在复杂环境下工作时涉及的人机交互的安全问题得到越来越多人的关注。当有可能发生碰撞,甚至已经发生碰撞等突发意外情况时,过去一般采用急停的方式立刻停止机械臂的所有运动。但在复杂的交互环境中,这种处理方式有时反而会增加对机械臂以及人员的伤害。因此,需要一种更加先进的方式实现安全避障(也叫避碰^[1]),并能保持机械臂的连续运动。

与一般非冗余机械臂相比,冗余机械臂在处理避障问题上具有明显优势。这是因为冗余机械臂可以利用多余的自由度避开障碍物,而又不影响末端执行器的操作。基于此,可以合理地利用机械臂的冗余自由度实现避障。

冗余机械臂的避障方法通常可以分为两类:全局规划和局部控制。全局规划,类似于上层路径规划,目的是尽可能找到一条从运动起点到运动终点的无碰撞路径^[2]。这类方法将机械臂和所有障碍物投影到 C 空间(Configuration Space),利用这个空间中未占用部分找到一条无碰撞路径^[3-5]。但是,这种算法运算需求量很大,而且计算时间也多于一般机械臂的响应时间。即使利用一些优化算法可以减小运算量^[6-7],其计算复杂度也限制了这类算法在实际避障中的应用。而另一类方法,局部控制,是把避障当作一个控制问题。这类方法与通过上层路径规划实现一次性全局避障不同,是通过底层控制实现实时局部避障。局部控制方法的优点是运算量较小而且更加灵活。

为了解决冗余机械臂的避障问题,很多学者提出了不同的局部控制避障方法。Maciejewski 和 Klein 提出的方法是利用避障任务空间向量分配临界点,使临界点远离障碍物^[8]。Glass 等人定义了描述避障的控制约束条件^[9]。封岸松和戴炬采用伪逆矩阵法,提出一种以机械臂和障碍物之间的距离作为求解逆运动学指标的避障方法^[10]。文献[11]基于势函数,求出障碍物的排斥力和目标位置的吸引力。Guo 和 Hsia 通过优化目标函数,使机械臂与障碍物之间的距离最大化^[12]。目前,大多数方法只在运动学上考虑了机械臂的避障问题,还有一些基于加速度或者力矩

的避障控制方法考虑了机械臂的动力学性能^[13]。实际上,从运动学角度处理机械臂避障问题,可以使系统具有良好的稳态特性,因此只需要知道机械臂的运动学和重力力矩;而从动力学角度处理机械臂避障问题的优点是可以直接将避障控制方法与已有的动力学控制方法相结合,强调机械臂与障碍物交互时的瞬态响应,进而在避障过程中实现期望的动态行为。

本文所提出的避障控制方法是一种考虑了机械臂动力学的局部控制方法,旨在解决一般逆动力学控制方法中存在的无法实现冗余机械臂自身避障的问题。该方法的优点是将机械臂抽象为一个可变参数化质量-阻尼系统,实现期望的柔顺避障行为。众所周知,当有外力作用于冗余机械臂本体时,一般会导致后者形成自运动。因此,本文所提出的方法中利用一种虚拟力造成的机械臂自运动来实现避障。当机械臂靠近障碍物时,作用在机械臂上的虚拟力是由障碍物指向机械臂的一种排斥力。在这种虚拟排斥力的作用下,避免机械臂与障碍物发生接触。为了计算虚拟排斥力,根据七自由度冗余机械臂的构型,分别引入了臂平面及其在虚拟排斥力作用下转动产生的避障面来描述冗余机械臂的自运动。基于这种描述,推导表征质量-阻尼系统的二阶线性方程,改进具有位置内环的逆运动学控制方法,使其能够平滑地控制冗余机械臂自运动来实现避障,而且不影响末端执行器的位置跟踪精度。

2 位置内环冗余机械臂逆动力学控制

考虑一个具有 n 个自由度的机械臂及其与环境的接触力,系统的动力学方程一般形式可以写为:

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q}) + d(q, \dot{q}) + G(q) = \tau_a + \tau_{ext}, \quad (1)$$

式中: $q \in \mathbb{R}^n$ 是关节角度矢量, $\dot{q} \in \mathbb{R}^n$ 是关节角速度矢量, $\ddot{q} \in \mathbb{R}^n$ 是关节角加速度矢量, $M \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 是正定惯量矩阵, $C \in \mathbb{R}^n$ 是哥氏力和离心力矢量, $d \in \mathbb{R}^n$ 是关节摩擦力矢量, $G \in \mathbb{R}^n$ 是重力矢量, $\tau_a \in \mathbb{R}^n$ 是关节驱动力矩矢量, $\tau_{ext} \in \mathbb{R}^n$ 是自环境作用在机械臂的接触力矩矢量。为了简化方程,引入下列表达式:

$$\tau_a = \tau + \eta, \quad (2)$$

式中,

$$\boldsymbol{\eta} \triangleq \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{d}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{G}(\mathbf{q}), \quad (3)$$

进而,式(1)可以写为隐含前馈项 $\boldsymbol{\eta} \in \mathfrak{R}^n$, 并将 $\boldsymbol{\tau} \in \mathfrak{R}^n$ 作为输入项的形式:

$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} = \boldsymbol{\tau} + \boldsymbol{\tau}_{\text{ext}}. \quad (4)$$

通常情况下,机械臂的实际操作是其末端执行器在操作空间中完成的,因此与关节空间相比,设计操作空间的控制器更具有实际意义。在 m 维操作空间中,末端执行器的笛卡尔位姿 \mathbf{x} 可以描述为关于其坐标轴/角的 m 维矢量。进而,笛卡尔速度 $\dot{\mathbf{x}}$ 可以描述为扭转,笛卡尔加速度 $\ddot{\mathbf{x}}$ 可以描述为其导数。 n 自由度机械臂与其所在 m 维操作空间的关系可以表示为:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{J}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}}, \mathbf{J}(\mathbf{q}) = \frac{\partial \mathbf{k}(\mathbf{q})}{\partial \mathbf{q}}, \quad (5)$$

$$\ddot{\mathbf{x}} = \mathbf{J}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}), \mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \triangleq \dot{\mathbf{J}}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}}, \quad (6)$$

式中: $\mathbf{k}(\cdot): \mathfrak{R}^n \rightarrow \mathfrak{R}^m$ 是正运动学, $\mathbf{J} \in \mathfrak{R}^{m \times n}$ 是雅克比矩阵,这个矩阵把关节速度映射到机械臂末端的笛卡尔线/角速度。对于冗余机械臂,有 $n > m$, 且冗余自由度 $r = n - m$ 。因此,需要 r 维矢量来描述雅克比矩阵 \mathbf{J} 的零空间。利用 r 维零空间速度矢量 $\dot{\mathbf{x}}_N = \mathbf{J}_N(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}}$, 式(5)可以重写为包含扩展雅克比矩阵 $\mathbf{J}_E(\mathbf{q}) \in \mathfrak{R}^{m \times m}$ 的形式:

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{x}} \\ \dot{\mathbf{x}}_N \end{bmatrix} = \mathbf{J}_E(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}} = \begin{pmatrix} \mathbf{J}(\mathbf{q}) \\ \mathbf{J}_N(\mathbf{q}) \end{pmatrix} \dot{\mathbf{q}}, \quad (7)$$

式中, $\mathbf{J}_N \in \mathfrak{R}^{r \times n}$ 是零空间雅克比矩阵。

用 $\dot{\mathbf{x}}$ 重写式(6),有:

$$\ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{J}^\dagger(\ddot{\mathbf{x}} - \mathbf{h}) + \mathbf{N}^\top \boldsymbol{\lambda}, \quad (8)$$

式中, $\mathbf{J}^\dagger \in \mathfrak{R}^{n \times m}$ 是 \mathbf{J} 的伪逆矩阵, $\mathbf{N} \in \mathfrak{R}^{r \times n}$ 是 \mathbf{J} 的零空间基矩阵,有 $\mathbf{J}(\mathbf{q})\mathbf{N}(\mathbf{q})^\top = \mathbf{0}$, $\boldsymbol{\lambda} \in \mathfrak{R}^{r \times m}$ 是一个矢量,其取值不影响笛卡尔空间运动,但可以用来实现期望的零空间运动。代入式(4),有:

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{M}\mathbf{J}^\dagger[\ddot{\mathbf{x}} - \mathbf{h}] + \mathbf{M}\mathbf{N}^\top \boldsymbol{\lambda} - \boldsymbol{\tau}_{\text{ext}}, \quad (9)$$

利用力雅克比关系 $\boldsymbol{\tau}_{\text{ext}} = \mathbf{J}^\top \mathbf{f}$, 其中 \mathbf{f} 是作用在末端执行器的接触力:

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{M}\mathbf{J}^\dagger[\ddot{\mathbf{x}} - \mathbf{h}] + \mathbf{M}\mathbf{N}^\top \boldsymbol{\lambda} - \mathbf{J}^\top \mathbf{f}. \quad (10)$$

为了提高末端执行器的位置跟踪精度和抵抗外部干扰能力,引入笛卡尔位置内环,定义新的控制输入项为:

$$\ddot{\mathbf{x}}^* = \ddot{\mathbf{x}} + k_D \dot{\tilde{\mathbf{x}}} + k_p \tilde{\mathbf{x}}, \quad (11)$$

式中 $\tilde{\mathbf{x}} \in \mathfrak{R}^m$ 是笛卡尔空间期望位置与实际位置误

差, $\dot{\tilde{\mathbf{x}}} \in \mathfrak{R}^m$ 是笛卡尔空间期望速度与实际速度误差, k_p 和 k_D 是位置内环增益。再代入到式(11),最终得到:

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{M}\mathbf{J}^\dagger[\ddot{\mathbf{x}}^* - \mathbf{h}] + \mathbf{M}\mathbf{N}^\top \boldsymbol{\lambda} - \mathbf{J}^\top \mathbf{f}. \quad (12)$$

对于七自由度冗余机械臂($n=7$ 且 $m=6$, 即冗余自由度为 1), 这种控制方法利用位置内环,实现末端执行器笛卡尔空间运动控制,相比于一般的逆动力学控制方法,具有较高的末端执行器位置跟踪精度。但是,对于输入项 $\boldsymbol{\lambda}$, 尽管其取值不影响末端执行器笛卡尔空间运动,仍然需要进一步考虑如何通过优化变量 $\boldsymbol{\lambda}$ 实现机械臂自身零空间运动(即自运动)的合理利用,这将在下一节予以讨论。

3 七自由度冗余机械臂自运动避障

在笛卡尔空间,利用具有位置内环的逆动力学控制方法,可以控制末端执行器运动。但如上一节所述,这种方法还可以进一步利用冗余机械臂自身的零空间运动实现优化。本节主要目的是提出一种利用冗余机械臂自运动实现避障的控制方法,该方法满足如下特性:

- (1)明确物理量表示冗余机械臂零空间运动;
- (2)基于这个物理量检测可能发生的碰撞;
- (3)根据碰撞检测结果实现机械臂避障控制。

3.1 零空间运动模型

依次串联配置球形关节-旋转关节-球形关节(简称 S-R-S)机械臂,因其拟人化而经常用作仿人机器人,因此本文中七自由度冗余机械臂的构型限定为 S-R-S 模型(如图 1 所示)。为了便于在笛卡尔空间分析机械臂的冗余自由度, Kreutz-Delgado 等人提出一个基于冗余机械臂自运动的参数“臂角”,它的定义是由肩关节、肘关节和腕关节三点确定的臂平面与参考面的角度差^[14]。因为臂角是相当于机械臂的冗余自由度,所以无论末端执行器处于什么位姿,臂角都可以任意选取。但是,在原定义中参考面由一个固定矢量确定,这可能出现算法奇异问题。本文引入一个避障面,臂角被重新定义为避障面与臂平面之间的角度。如果确定了臂角,那么避障面也是唯一确定的。

考虑笛卡尔空间位姿,令 $\mathbf{r}^j \in \mathfrak{R}^3$ 表示位置矢量, $\mathbf{R}^j \in \mathfrak{R}^{3 \times 3}$ 表示旋转矩阵,式中上标 j 表示参考

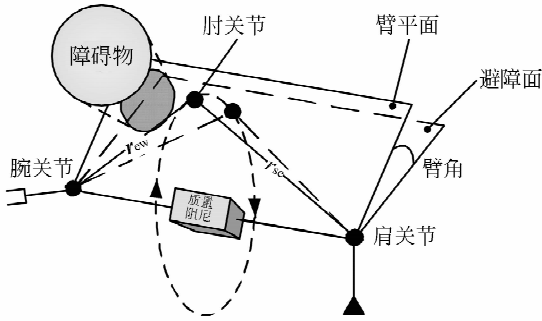


图 1 冗余机械臂避障模型

Fig. 1 Redundant manipulator model with obstacle avoidance

点。从期望臂平面到避障面的自运动可以表示为绕肩关节和腕关节所在轴矢量旋转一定角度,旋转角度等于臂角。这个矢量可以通过下式计算:

$$\mathbf{r}_{sw}^0 = \mathbf{R}_3^0(\mathbf{r}_{se}^3 + \mathbf{R}_1^3 \mathbf{r}_{ew}^4), \quad (13)$$

式中, $\mathbf{r}_{se}^3 \in \mathfrak{R}^3$ 和 $\mathbf{r}_{ew}^4 \in \mathfrak{R}^3$ 是常矢量, 通过下式给出:

$$\mathbf{r}_{se}^3 = [0 \quad d_{se} \quad 0]^T, \quad (14)$$

$$\mathbf{r}_{ew}^4 = [0 \quad 0 \quad d_{ew}]^T, \quad (15)$$

式中 d_{se} 是上臂长度, d_{ew} 是下臂长度。需要特别指出的是, \mathbf{r}_{se}^3 和 \mathbf{r}_{ew}^4 的表达式并不是唯一确定的, 它们随着机械臂 D-H 参数的定义有所变化。

从期望臂平面到避障面的臂角 $\tilde{\psi}$ 的旋转矩阵可以通过下式计算:

$$\mathbf{R}_N = \mathbf{I}_3 + \sin \tilde{\psi} \tilde{\mathbf{r}}_{sw}^0 + (1 - \cos \tilde{\psi}) \tilde{\mathbf{r}}_{sw}^0 \tilde{\mathbf{r}}_{sw}^0, \quad (16)$$

式中 $\mathbf{I}_3 \in \mathfrak{R}^{3 \times 3}$ 是单位矩阵, $\tilde{\mathbf{r}}_{sw}^0 \in \mathfrak{R}^{3 \times 3}$ 是 \mathbf{r}_{sw}^0 的单位矢量, $\tilde{\mathbf{r}}_{sw}^0 \in \mathfrak{R}^{3 \times 3}$ 是 \mathbf{r}_{sw}^0 的反对称矩阵。所以, 零空间运动的速度变化可以表示为:

$$\dot{\mathbf{x}}_N = o'(\tilde{\psi}), \quad (17)$$

式中 $o(\cdot)$ 是一个在区间 $(-\tilde{\psi}_m, \tilde{\psi}_m)$ 严格单调递增函数, 满足 $\tilde{\psi}_m > 0$ 且 $o(0) = 0$ (见表 1)。

表 1 函数 o 的选取

Tab. 1 Selection of function o

函数描述	符号
描述方法	$o(\tilde{\psi})$
简洁描述	$\tilde{\psi}$
经典描述	$\sin(\tilde{\psi})$
欧拉描述	$\sin(\tilde{\psi}/2)$

3.2 碰撞检测

当肩关节、肘关节和腕关节 3 点包围的封闭臂平面与障碍物相切或者重叠时, 机械臂与障碍物有可能发生碰撞, 否则不会发生碰撞。因此, 只需要考虑臂平面与障碍物相切或者重叠的情况。为了进一步检测机械臂与环境障碍物之间可能发生的碰撞, 基于人工势场法引入作用在臂平面法线方向的虚拟排斥力。

用正常数 d_{safe} 和 d_{lim} 分别表示当机械臂靠近障碍物时受势场范围影响的安全距离和极限距离, 且满足 $d_{safe} > d_{lim}$ 。进而, 根据机械臂所处环境的三维空间数据(可根据距离传感器或者视觉摄像机^[15]等获得), 可以得到 2 个由障碍物的势场等位面形成的包围壳(如图 2 所示)。其中, d 表示封闭臂平面与障碍物表面的最小距离。

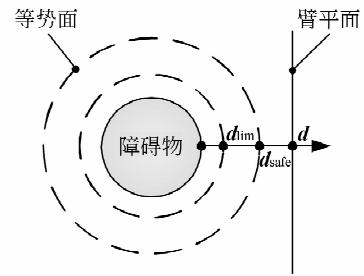


图 2 臂平面与障碍物之间的距离关系

Fig. 2 Relation of distance between arm plane and obstacle

根据 d, d_{saf} 和 d_{lim} 计算虚拟排斥力:

$$f_v = \begin{cases} 0 & d > d_{safe} \\ K \left(\frac{1}{d} - \frac{1}{d_{safe}} \right) & d_{lim} < d < d_{safe} \\ f_{max} & d < d_{lim} \end{cases}, \quad (18)$$

式中 f_{max} 是虚拟排斥力最大值, K 是比例系数, 有如下关系:

$$K = f_{max} \frac{d_{safe} - d_{lim}}{d_{safe} d_{lim}}. \quad (19)$$

式(18)的定义相当于对机械臂形成了两层保护。第一层保护是当机械臂运动过程中靠近障碍物, d 小于安全距离 d_{safe} 时, 虚拟排斥力 f_v 的值在 $0 \sim f_{max}$ 之间连续变化。第二层保护是当机械臂进一步靠近障碍物, d 小于极限距离 d_{lim} 时, 虚拟排斥力 f_v 的值恒为 f_{max} 。这时认为系统已经处于紧急情况, 为了保护机械臂, 可以暂时减慢甚至停

止末端执行器运动,等待机械臂安全脱离极限区域之后,再恢复操作。

对于环境中存在不止一个障碍物的情况,虚拟排斥力 f_V 可以表示为对应多个障碍物的虚拟排斥力之和,即:

$$f_V = \sum_n f_{Vn}. \quad (20)$$

式中 n 是环境中障碍物的数量, f_{Vn} 是对应第 n 个障碍物的虚拟排斥力。

3.3 自运动避障

为了平滑地控制机械臂在虚拟排斥力作用下的自运动,定义如下二阶线性微分方程:

$$M_N \ddot{x}_N + D_N \dot{x}_N = f_V, \quad (21)$$

式中, M_N 是惯量系数, D_N 是阻尼系数,均为正数。通过对虚拟排斥力 f_V 前向积分可以求得 \dot{x}_N 及其导数 \ddot{x}_N 。利用求得的 \ddot{x}_N ,可以得到与式(8)相类似的方程:

$$\ddot{q}_N = N^T [M_N^{-1} (f_V - D_N \dot{x}_N) - h_N], \quad (22)$$

式中

$$h_N \triangleq J_N \dot{q}_N. \quad (23)$$

再将式(22)代入到式(8),得到新的期望角加速度:

$$\ddot{q} = J^\dagger (\ddot{x} - h) + N^T [M_N^{-1} (f_V - D_N \dot{x}_N) - h_N]. \quad (24)$$

最终,利用上式修改式(12),得到

$$\tau = MJ^\dagger [\ddot{x}^* - h] - J^T f + MN^T [M_N^{-1} (f_V - D_N \dot{x}_N) - h_N]. \quad (25)$$

需要特别指出的是,当处于紧急情况,即 d 小于极限距离 d_{lim} 时,可以令位置内环增益 k_p 和 k_D 取较小值或者等于 0 来降低末端执行器刚度并减慢其运动速度。

4 实 验

为了评估所提出的基于自运动的冗余机械臂避障控制方法,利用在轨自维护实验平台完成了实验。该平台包含一个七自由度 HIT 轻型机械臂。机械臂关节采用机电一体化设计,通过谐波减速器由无刷电机驱动,并利用绝对位置传感器提供关节角度信息。一台 PCI104 上位机通过 PPSeCo 总线与集成在关节内的 FPGA 控制器通信^[16],通信周期为 1 ms(如图 3 所示)。上位机使用酷睿双核处理器完成机械臂笛卡尔空间闭环控

制与计算,并通过 PCI 总线实现总线数据交换。关节控制器使用 NIOS 处理器,按照接收的上位机指令控制电机,并将读取的传感器数据返回上位机。

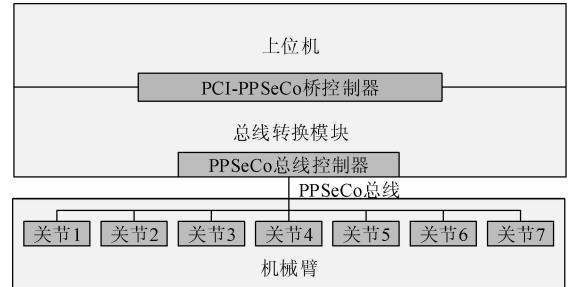


图 3 实验平台控制结构

Fig. 3 Control structure of experimental platform

机械臂臂杆参数见表 2。

表 2 七自由度冗余机械臂的臂杆参数

Tab. 2 Link parameters of a 7-DOF manipulator model

连杆	长度/m	质量/kg 和 惯量/(kg · m ²)
1	0.10	3.47, (0.012, 0.010, 0.009)
2	0.20	2.37, (0.020, 0.025, 0.023)
3	0.20	2.25, (0.003, 0.008, 0.009)
4	0.14	1.79, (0.002, 0.044, 0.044)
5	0.14	1.72, (0.003, 0.003, 0.003)
6	0.14	1.80, (0.002, 0.005, 0.005)

机械臂其他主要控制参数设置为 $K=6.00$ N/m, $d_{safe}=0.05$ m 和 $d_{lim}=0.01$ m。

实验的主要任务是末端执行器拉动卫星一侧的太阳能帆板,从(0.2,0,-0.5 m)移动到(0,0,-0.5 m)(即水平移动 0.2 m),且姿态保持不变。轨迹由七次多项式插值生成,规划的初始速度/加速度和最终速度/加速度均为零。考虑机械臂与障碍物碰撞的情况,另一侧的太阳能帆板被垂直固定在距离机械臂基座 0.35 m 处。在操作过程中,无避障控制机械臂的肘部与帆板发生碰撞(如图 4(a)所示)。再利用机械臂的冗余自由度,使其肘部不断向下摆动,可以避开障碍物,且不影响末端操作(如图 4(b)所示)。

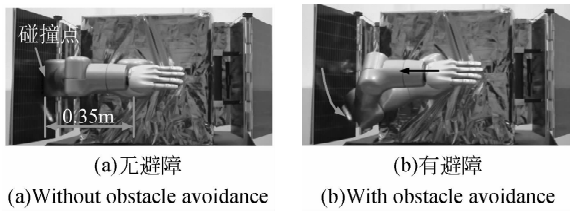


图 4 避障实验

Fig. 4 Experiments of obstacle avoidance

实验初始时,机械臂与障碍物之间的最小距离是 69 mm,随着末端执行器的操作,机械臂逐渐靠近障碍物,并在第 3 s 时机械臂与障碍物的最小距离达到设定的安全距离(50 mm),而机械臂仍继续靠近障碍物,这是由于设计的质量-阻尼系统自身惯量导致的,但在虚拟排斥力下靠近速度逐渐减慢,之后机械臂停止靠近障碍物,最终与障碍物保持 42 mm 的最小距离(如图 5(a)所示)。当系统处于安全距离内时,在人工势场等位面上产生了作用于机械臂的虚拟排斥力,阻碍其靠近障碍物,且随着机械臂与障碍物之间最小距离的变化,在机械臂与障碍物最近时达到最大,并最终稳定在 23 N(如图 5(b)所示)。在这个虚拟排斥力作用下,臂平面向避障面方向扭转,形成了机械臂的自运动。整个实验过程中,为了避开障碍物,机械臂的臂平面扭转了 43° (如图 5(c)所示),而末端执行器位置动态误差小于 10 mm,稳态误差小于 2 mm(如图 6 所示),误差主要是由机械臂臂杆参数误差和关节柔性造成的。

为了验证设计的质量-阻尼系统对机械臂避障行为的影响,选取了 3 组不同系统参数的实验数据进行对比($M_N=0.02\text{ kg}, D_N=1.00\text{ Ns/m}$; $M_N=0.02\text{ kg}, D_N=2.00\text{ Ns/m}$; $M_N=0.00\text{ kg}, D_N=1.00\text{ Ns/m}$)。从实验曲线中可以看出,尽管惯量参数和阻尼参数各不相同,但系统最终都稳定在同一状态,机械臂表现出相同的稳态特性,而避障过程中表现出的动态特性却大相径庭。惯量参数越大,机械臂在虚拟排斥力的作用下表现越笨重,反之则越灵活;阻尼参数越大,机械臂进入稳定状态的时间越长,波动越平稳,反之则时间越短,波动越剧烈。

综上所述,机械臂完成了拉动太阳能帆板的任务,并避免了与障碍物发生碰撞,实验结果达到预期要求。所提出的控制方法实现了平滑的机械臂自运动,并使虚拟排斥力保持在一定范围内。

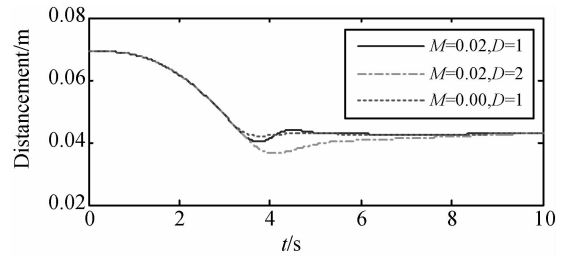
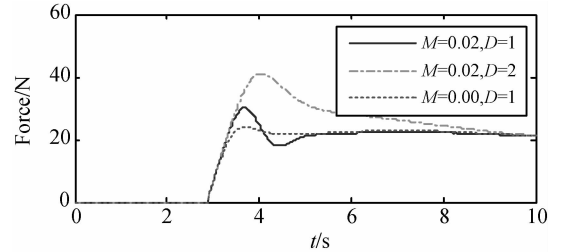
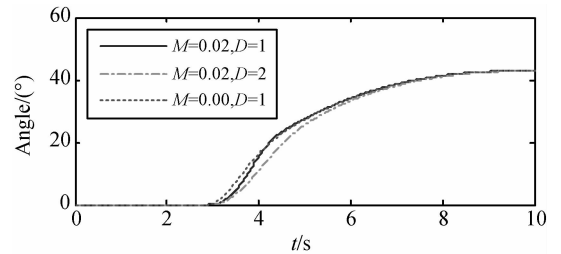
(a) 机械臂与障碍物之间的距离变化曲线
(a) Distance between manipulator and obstacle(b) 虚拟排斥力
(b) Virtual repulsive force(c) 臂角
(c) Arm angle

图 5 实验曲线

Fig. 5 Experimental curves

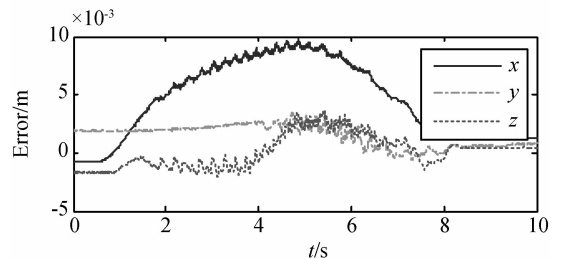


图 6 末端执行器位置误差

Fig. 6 Position error of end-effector

根据虚拟排斥力与距离的线性关系,也就是说机械臂与障碍物之间始终保持一定距离。机械臂与障碍物交互时表现出的动态性能与设计的质量-阻尼系统的物理特性一致,并可以通过参数调整机械臂避障时的动作行为。而且整个实验过程中,包括避障时,机械臂末端执行器的操作没有受

到影响。

5 结 论

本文系统地提出了一种在轨自维护冗余机械臂逆动力学避障控制方法,这种方法可以合理有效地利用冗余机械臂的零空间运动实现避障,同时保证末端执行器的轨迹跟踪,并可以通

过设置参数调整机械臂对障碍物的动态响应特性。设计了实验,实验中,机械臂与障碍物的最近距离大于 40 mm,末端执行器位置动态误差小于 10 mm,稳态误差小于 2 mm,验证了该方法的有效性。实验结果还表明,即使在避障过程中,末端执行器的操作也没有受到影响,机械臂零空间的动态性能与设计的质量-阻尼系统的物理特性一致。

参考文献:

- [1] 黄献龙,梁斌,吴宏鑫. 机器人避碰规划综述[J]. 航天控制,2002,20(1):34-40,46.
HUANG X L, LIANG B, WU H X. A survey on robotics collision avoidance planning [J]. *Aerospace Control*, 2002, 20(1): 34-40, 46. (in Chinese)
- [2] 张芳,颜国正,林良明. 面向多机器人路径规划的一种基于模糊模型的再励函数结构[J]. 光学精密工程,2002,10(2):148-153.
ZHANG F, YAN G ZH, LIN L M. Multi-robot path planning-oriented and fuzzy model-based reinforcement function structures [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002, 10(2): 148-153. (in Chinese)
- [3] 谢碧云,赵京,刘宇. 基于快速扩展随机树的7R机械臂避障达点运动规划[J]. 机械工程学报,2012,48(3):63-69.
XIE B Y, ZHAO J, LIU Y. Motion planning of reaching point movements for 7R robotic manipulators in obstacle environment based on rapidly-exploring random tree algorithm [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2012, 48(3): 63-69. (in Chinese)
- [4] 周芳,朱齐丹,赵国良. 基于改进快速搜索随机树法的机械手路径优化[J]. 机械工程学报,2011,47(11):30-35.
ZHOU F, ZHU Q D, ZHAO G L. Path optimization of manipulator based on the improved rapidly-exploring random tree algorithm [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 47(11): 30-35. (in Chinese)
- [5] 黄一飞. 空间机器人避障路径规划的C空间简化方法[J]. 软件导刊,2012,11(4):27-29.
HUANG Y F. Simplified method for C-space obstacle avoidance path planning of space robotics [J]. *Software Guide*, 2012, 11(4): 27-29. (in Chinese)
- [6] 杨明远,孙汉旭,贾庆轩,等. 七自由度空间机械臂避障路径规划方法[J]. 航天器工程,2011,20(4):65-71.
YANG M Y, SUN H X, JIA Q X, et al.. Research on path planning for 7-DOF space manipulator to avoid obstacle [J]. *Spacecraft Engineering*, 2011, 20(4): 65-71. (in Chinese)
- [7] 王悦,贾英宏,徐世杰. 冗余空间机械臂粗捕获段无碰撞轨迹规划算法[J]. 中国空间科学技术,2012,32(3):49-56.
WANG Y, JIA Y H, XU SH J. Collision-free motion planning algorithm for redundant space manipulators during coarse target capturing [J]. *Chinese Space Science and Technology*, 2012, 32(3): 49-56. (in Chinese)
- [8] MACIEJEWSKI A A, KLEIN C A. Obstacle avoidance for kinematically redundant manipulators in dynamically varying environments [J]. *The International Journal of Robotics Research*, 1985; 4(3):109-117.
- [9] GLASS K, COLBAUGH R, LIM D, et al.. Real-time collision avoidance for redundant manipulators [J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1995, 11(3):448-457.
- [10] 封岸松,戴炬. 冗余自由度机械手的避障控制[J]. 机器人,2002,24(3):213-216.
FENG A S, DAI J. Obstacle avoidance control about redundant manipulator [J]. *Robot*, 2002, 24(3): 213-216. (in Chinese)
- [11] 王俊龙,张国良,羊帆,等. 改进人工势场法的机械臂避障路径规划[J/OL]. 计算机工程与应用, [2012-06-29]. <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2127.TP.20120629.1645.001.html>.
WANG J L, ZHANG G L, YANG F, et al.. Improved artificial field method on obstacle avoidance path planning for manipulator [J/OL]. *Computer*

- Engineering and Applications*, [2012-06-29]. <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2127.TP.20120629.1645.001.html>. (in Chinese)
- [12] GUO Z Y, HSIA T C. Joint trajectory generation for redundant robots in an environment with obstacles [C]. *IEEE International Conference on Robotics and Automation, Piscataway, NJ, USA, 1990*; 157-162.
- [13] BROCK O, KHATIB O, VIJI S. Task-consistent obstacle avoidance and motion behavior for mobile manipulation [C]. *IEEE International Conference on Robotics and Automation, Piscataway, NJ, USA, 2002*,1: 388-393.
- [14] KREUTZ-DELGADO K, LONG M, SERAJI H. Kinematic analysis of 7 DOF anthropomorphic arms [C]. *IEEE International Conference on Robotics and Automation, Piscataway, NJ, USA, 1990*; 824-830.
- [15] 郑时雄, 刘桂雄, 阎华, 等. 机器人视觉在自动装配线中的应用[J]. *光学精密工程*, 1998, 6(1): 90-94.
- ZHENG SH X, LIU G X, YAN H, *et al.*. Applications of robotics vision system in automatic assembly [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1998, 6(1): 90-94. (in Chinese)
- [16] ZHOU Y, WANG B, JIANG L, *et al.*. A real-time controller development framework for high degrees of freedom systems [C]. *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, Piscataway, NJ, USA, 2012*; 291-296.

作者简介:



周 扬(1983—),男,黑龙江哈尔滨人,博士研究生,2006年、2008年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士学位,主要研究方向为嵌入式系统、柔性机器人控制和双臂机器人协调操作。E-mail: mr.zhou.yang@gmail.com



刘 宏(1966—),男,安徽合肥人,博士,教授,1993年于哈尔滨工业大学获得博士学位,主要研究方向为空间机器人技术、传感器技术和生物机电一体化技术。E-mail: hong.liu@hit.edu.cn

导师简介:



孙 奎(1974—),男,黑龙江哈尔滨人,博士,讲师,2008年于哈尔滨工业大学获得博士学位,主要研究方向为冗余机器人运动学和动力学算法,以及空间机器人技术。E-mail: sunkui@hit.edu.cn



姜 力(1970—),男,黑龙江哈尔滨人,博士,教授,2001年于哈尔滨工业大学获得博士学位,主要研究方向为生物机电一体化系统及理论、多指灵巧手的操作控制以及机器人传感和控制技术。E-mail: jiangli01@hit.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)