

人机协作下的机械臂轨迹生成与修正方法

刘维惠, 陈殿生, 张立志

(北京航空航天大学机械工程及自动化学院, 北京 100191)

摘要: 针对日常生活中多障碍物环境下的服务机器人机械臂轨迹规划问题, 提出了一种人机协作下的轨迹生成与修正方法. 首先, 基于动态动作基元 (DMP) 模型, 设计了一个能生成与示教轨迹形状相似的路径的方法. 该方法针对多自由度耦合产生的轨迹形状畸变问题, 通过将 3 维目标点投影于示教轨迹平面, 再利用罗德里格旋转公式生成 3 维路径, 保证了生成轨迹在各个方向都具有较稳定的形状特征. 其次, 针对存在多种形状障碍物的复杂操作环境, 提出了通过插入交互点对轨迹形状进行修正的方法. 并采用双抛物线插值算法使修正后的轨迹平滑. 最后, 基于人机协作的思想, 在 ROS (robot operating system) 环境下搭建一个交互界面. 从而操作者能够直观地辅助机械臂完成无障碍物和有障碍物的情况下的末端轨迹生成和修正. 实验结果验证了该方法的直观性和灵活性, 该方法适用于具有多种障碍物的复杂日常环境.

关键词: 人机协作; 机械臂; 轨迹生成; 避障; 人机交互界面; 服务机器人

中图分类号: TP242.6

文献标识码: A

文章编号: 1002-0446(2016)-04-0504-09

Trajectory Generation and Adjustment Method for Robot Manipulators in Human-Robot Collaboration

LIU Weihui, CHEN Diansheng, ZHANG Lizhi

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: For trajectory planning of service robot manipulators in daily living environment with obstacles, a trajectory generation and adjustment method in human-robot collaboration is proposed. At first, an approach is designed to produce a trajectory with similar shape to the demonstrated one based on dynamic movement primitive (DMP) model. Here, the problem of shape distortion caused by multi-degree-of-freedom coupling is solved by projecting the 3D target point on a plane where the demonstration trajectory falls, then generating the 3D trajectory by using Rodrigues' rotation formula. Thus the shape character of the produced trajectory can be ensured in all directions. Secondly, the trajectory can be adjusted by inserting interactive points to meet the operation requirements in cases of complex environments with obstacles in different shapes, and then it is smoothened by dual parabolic interpolation algorithm. Lastly, an interactive interface is built in ROS (robot operating system) under the idea of human-robot collaboration. Operators can intuitively help a manipulator to generate and adjust the 3D trajectory of the end-effector in the environment with or without obstacles. Obstacle-avoidance experiments validate the intuitiveness and flexibility of the proposed approach, which can adapt to complex daily-living environment with multiple kinds of obstacles.

Keywords: human-robot collaboration; robot manipulator; trajectory generation; obstacle avoidance; human robot interaction interface; service robot

1 引言 (Introduction)

实现自然友好的人机交互是服务机器人技术步入人类日常生活的重要前提^[1]. 而复杂抽象的控制方式成为阻碍机器人技术被使用者广泛接受的壁垒. 基于多种人机交互信息的机器人能够通过示教学习 (learning from demonstration)^[2], 完成在

新环境下对示教动作的再现, 且不需要操作者具有良好的专业知识背景和编程能力. 因此, 示教学习已成为机器人领域的核心课题之一. 根据示教者是否与机器人直接发生物理上的接触可分为动觉示教 (kinesthetic demonstration)^[3] 和远程示教 (teleoperation demonstration)^[4] 2 种方式. 动觉示教是操作者直接控制机器人完成相应动作, 采集机

机器人自身信息并以该信息为学习对象. 这种模式下机器人必须被动可控, 且操作者需要使用多于被控对象的自由度来控制其运动, 故不适用于多自由度的机械臂. 远程示教往往通过视觉^[5]、穿戴式传感器^[6]或远程控制工具^[7]等来控制机器人运动. 由于不需要操作者与机器人直接接触, 故示教过程相对安全, 更适用于无经验操作者.

为保证机器人能够在动态复杂的生活环境中完成机械臂操作任务, 如抓取物体, 机器人需要具有一定的避障能力. 动态动作基元 DMP (dynamic movement primitive)^[8] 凭借其较好的泛化性和抗干扰性, 通常结合路径规划算法用来实现障碍物环境下动作轨迹的生成. 常用的路径规划算法主要分为全局算法 (如构型 (configuration) 空间法^[9] 与基于采样的方法^[10] 等) 和局部避障算法 (如人工势场法^[11]). 全局避障算法由于需要全局建模或搜索最优解, 计算过程比较耗时、实时性低. 文 [11] 采用 DMP 模型结合人工势场法, 实现针对球形障碍物的轨迹生成. 该方法需要具体的障碍物信息来计算障碍物附近的排斥力, 为了简便计算, 障碍物全部用包络球表示. 但当障碍物形状与球形相差较大时, 包络球占据较大的有效工作空间, 可能会造成无解. 文 [12-13] 在 DMP 模型上增加耦合项, 用于学习示教者手臂的避障动作轨迹. 其中, 文 [12] 经过多次示教, 可结合环境的反馈信息, 实现对不同类型障碍物的避障. 但与传统 DMP 方法相比, 由于需要学习多种人体避障动作, 示教过程相对复杂且生成轨迹不可灵活调整; 文 [13] 较详细地解释了当目标位置在某一方向与示教初始目标位置相反时, 利用 DMP 模型生成轨迹会产生轨迹形状畸变的问题, 且该畸变在多自由度耦合时会更加明显.

机器人与人具有不同的优势和劣势^[14], 例如人具有很好的直观感觉及智能, 而机器人具有更稳定快速的计算能力. 机器人需要大量的学习样本数据以提高其对不同环境的适应性. 不同于文 [12-13], 通过提高机器人的感知、预测等能力以适应多变的使用环境, 本文利用人类的自然知识来降低对协作机器人相应能力的要求, 以简化机器人编程和示教过程, 通过简单的控制方式完成多变复杂环境下的人机合作任务并搭建高效、友好的人机交互系统. 文 [15] 验证了人类可自然高效地完成 2 维空间下的避障任务, 但机器人却需要设计者的复杂编程来提高其避障性能^[16], 且不可按照使用者意愿灵活调整运动轨迹以适应环境中的变化. 因此需要设计一个友好的 2 维交互界面, 帮助操作者更好地理解机

器人的任务及状态, 从而利用人类的直观知识, 通过简单的操作辅助机器人完成任务.

2 3 维空间下的轨迹生成 (Trajectory generation in 3 dimensional space)

2.1 基于 DMP 模型的经典轨迹生成方法

DMP^[13,17] 的基本思想是, 用一个容易理解的动态系统解析式实现对动作轨迹的表达, 其中, 弹簧阻尼系统是最简单的一种表达方式.

$$\tau \dot{\mathbf{v}} = K(\mathbf{g} - \mathbf{x}) - D\mathbf{v} + (\mathbf{g} - \mathbf{x}_0)f \quad (1)$$

$$\tau \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{v} \quad (2)$$

其中, K 是弹簧系数, D 是阻尼系数; \mathbf{g} 是目标位置, \mathbf{x}_0 是初始位置, $\mathbf{g} - \mathbf{x}_0$ 相当于轨迹形状的比例系数, 用于新目标点与示教轨迹初始目标点较远时轨迹形状的缩放; \mathbf{x} 、 \mathbf{v} 、 $\dot{\mathbf{v}}$ 分别表示位置、速度和加速度; τ 是时间尺度参数, 影响动作生成的速度; 式 (1) 称作变换系统 (transformation system), 1 个自由度对应 1 个独立的变换系统, 其中 f 是非线性干扰力, 可以通过学习来生成特定形状轨迹, 其具体表达式如下:

$$f(s) = \frac{\sum_i \omega_i \psi_i(s)s}{\sum_i \psi_i(s)} \quad (3)$$

$$\tau \dot{s} = -\alpha s \quad (4)$$

其中, $\psi_i(s) = \exp(-h_i(s - c_i)^2)$ 是高斯基函数, 以 c_i 为中心, h_i 为宽度; 通过调整权值 ω_i , 式 (3) 可用来表达任意形状轨迹. α 是一个常数; s 是相参数, 初值为 1 并单调收敛于 0, 这意味着在靠近目标位置 \mathbf{g} 的过程中, 外力作用越来越小, 从而保证系统向目标收敛的稳定性. 式 (4) 称作正准系统 (canonical system), 用于实现多个变换系统即自由度间的耦合, 且不直接依赖于时间.

通过示教学习, 权值 ω_i 可通过最小化误差 $J = \sum_s (f_{\text{target}} - f(s))^2$ 确定, 其中, f_{target} 根据示教动作信息可得:

$$f_{\text{target}}(s) = \frac{-K(\mathbf{g} - \mathbf{x}) + D\mathbf{v} + \tau \dot{\mathbf{v}}}{\mathbf{g} - \mathbf{x}_0} \quad (5)$$

由式 (5) 可知, 当生成新动作轨迹时, 若在某一自由度上新目标位置 $\mathbf{g}_{\text{new}} - \mathbf{x}_0$ 与示教中的初始目标位置 $\mathbf{g} - \mathbf{x}_0$ 方向相反, 则该自由度轨迹形状是示教轨迹的镜像. 如图 1 所示, 轨迹 1 具有与示教轨迹相似的形状. 但因为轨迹 2、3 的目标点分别落

在 Z 轴和 X 轴负方向, 在该自由度上与示教轨迹初始目标点相反, 所以是其轨迹形状在该方向上的镜像. 若示教轨迹是桌面上目标物体的抓取路径, 轨迹 2 将会与桌面发生碰撞. 尤其在同时考虑 X 、 Y 、 Z 三个方向自由度的情况下, 轨迹的形状不再具有明显的示教轨迹形状特性, 如轨迹 4.

针对生成轨迹镜像问题, 文 [13] 通过在式 (1) 中增加耦合项保证轨迹形状不受目标点位置的影响. 本文采取另一简化模型 (6)^[18] 避免上述镜像问题.

$$\tau \dot{\mathbf{v}} = K(\mathbf{g} - \mathbf{x}) - D\mathbf{v} + \mathbf{f} \quad (6)$$

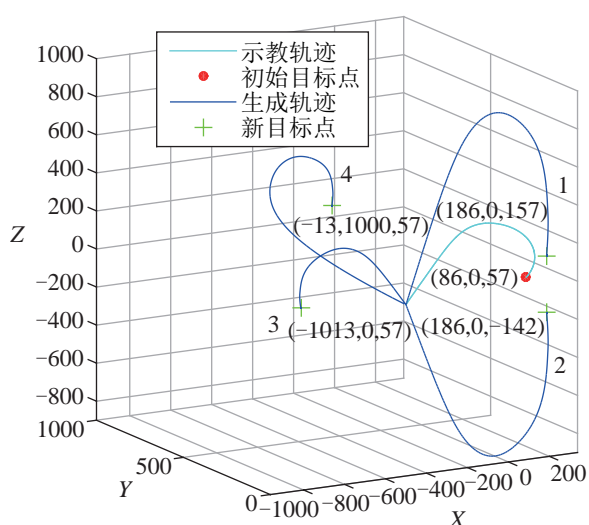


图 1 基于 DMP 模型的经典轨迹生成方法

Fig.1 Classical trajectory generation method based on DMP model

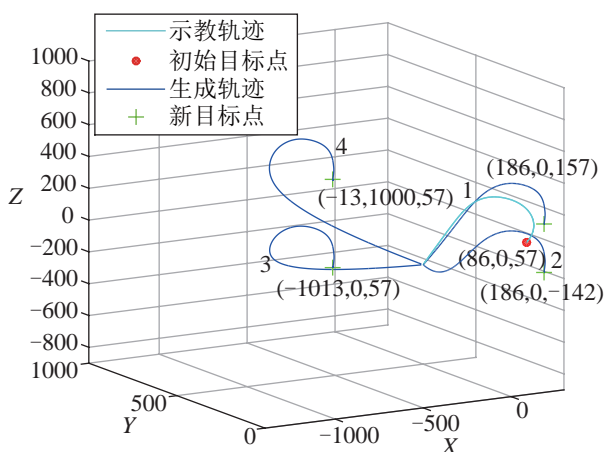


图 2 避免镜像的轨迹生成方法

Fig.2 Trajectory generation method to avoid reproducing mirror trajectory

式 (6) 中的参数同式 (1), 但其干扰力 \mathbf{f} 不受目标位置影响. 由于服务机器人机械臂的工作空间相对基座较为固定, 所以 $\mathbf{g} - \mathbf{x}_0$ 系数对轨迹缩放的影

响可以忽略. 其效果如图 2 所示. 轨迹 1、2 具有较好的形状特性, 且轨迹变化幅度与图 1 相比更加平稳. 但在 X 轴负方向, 由于受到的目标点吸引力与其轨迹变化趋势相反, 因此轨迹 3 丧失示教轨迹形状特征. 并同图 1, 该方法尚未解决多自由度耦合时轨迹畸变的问题, 见图 2 轨迹 4.

2.2 改进的 3 维轨迹生成方法

根据生活环境的使用要求, 如在桌面抓取水杯, 根据新目标点生成的轨迹需要在桌面法向保持轨迹形状不受目标点影响, 如图 2 中的轨迹 2, 但在沿桌面平面方向镜像, 如图 1 中的轨迹 3. 所以以上方法都不适用于在各个自由度上具有不同形状要求的机械臂末端轨迹生成.

据此, 本文首先采用降维的方法, 将新目标点投影到 2 维平面上, 利用修正的 DMP 模型生成中间轨迹, 再利用罗德里格旋转公式^[19] 得到最终 3 维轨迹, 从而满足轨迹形状在不同自由度上的要求并解决多自由度耦合时轨迹畸变的问题, 具体过程如下:

(1) 准备工作: 首先示教轨迹起始点平移至坐标原点 O_c , 并以 O_c 为所有轨迹共同起点, 确定示教轨迹所在平面 α 、法向量 \mathbf{e}_n 和轨迹中心轴的单位向量 \mathbf{e}_c . 在日常物品抓取任务中, 桌面法向量为中心轴 (Z 轴), 该方向的干扰力 \mathbf{f} 不受目标位置影响, 见图 3(a). 若所有示教轨迹点不在同一平面上, 示教轨迹上的点 P 用 $\overrightarrow{O_c P}$ 向量来表示, 前半部分轨迹点与后部分轨迹点间向量叉乘的平均值为平面法向量 \mathbf{e}_n , 如式 (7). 其中, N 是示教轨迹点总数.

$$\mathbf{e}_n = \frac{\sum_{i=1}^{N/2} (\overrightarrow{O_c P_i} \times \overrightarrow{O_c P_{i+N/2}})}{N/2} \quad (7)$$

(2) 求取示教轨迹的镜像轨迹, 见图 3(b). 示教轨迹上的点 P ($\overrightarrow{O_c P}$) 绕轴 \mathbf{e}_c 旋转 π , 旋转后该向量 $\overrightarrow{O_c P_{rot}}$ 根据罗德里格旋转公式为

$$\begin{aligned} \overrightarrow{O_c P_{rot}} &= \overrightarrow{O_c P} \cos \pi + (\mathbf{e}_c \times \overrightarrow{O_c P}) \sin \pi + \\ &\quad \mathbf{e}_c (\mathbf{e}_c \cdot \overrightarrow{O_c P}) (1 - \cos \pi) \\ &= \overrightarrow{O_c P} + 2\mathbf{e}_c (\mathbf{e}_c \cdot \overrightarrow{O_c P}) \end{aligned} \quad (8)$$

(3) 在平面 α 上生成轨迹: 首先将新目标点 P_t 映射于平面 α , 选择靠近投影点的示教轨迹为训练轨迹, P_g 为训练轨迹终点. 在 $\overrightarrow{O_c P_g}$ 方向上, 根据实际目标点 P_t 到起始点 P_{start} 的距离确定临时目标点 P^* , 基于 DMP 模型式 (6), 生成新轨迹. 效果见图 3(c).

(4) 旋转生成 3 维轨迹: 通过计算临时目标点 $\overrightarrow{O_c P^*}$ 与真实目标点 $\overrightarrow{O_c P_t}$ 的夹角 θ 及 P_t 、 P^* 、 O_c 所在平面法向量 \mathbf{n} , 利用罗德里格公式, 可将在示教

平面生成的轨迹旋转生成 3 维轨迹, 旋转后 P^* 与实际目标点 P_t 重合. 最后根据起始点 P_{start} 的位置平移整条轨迹, 见图 3(d).

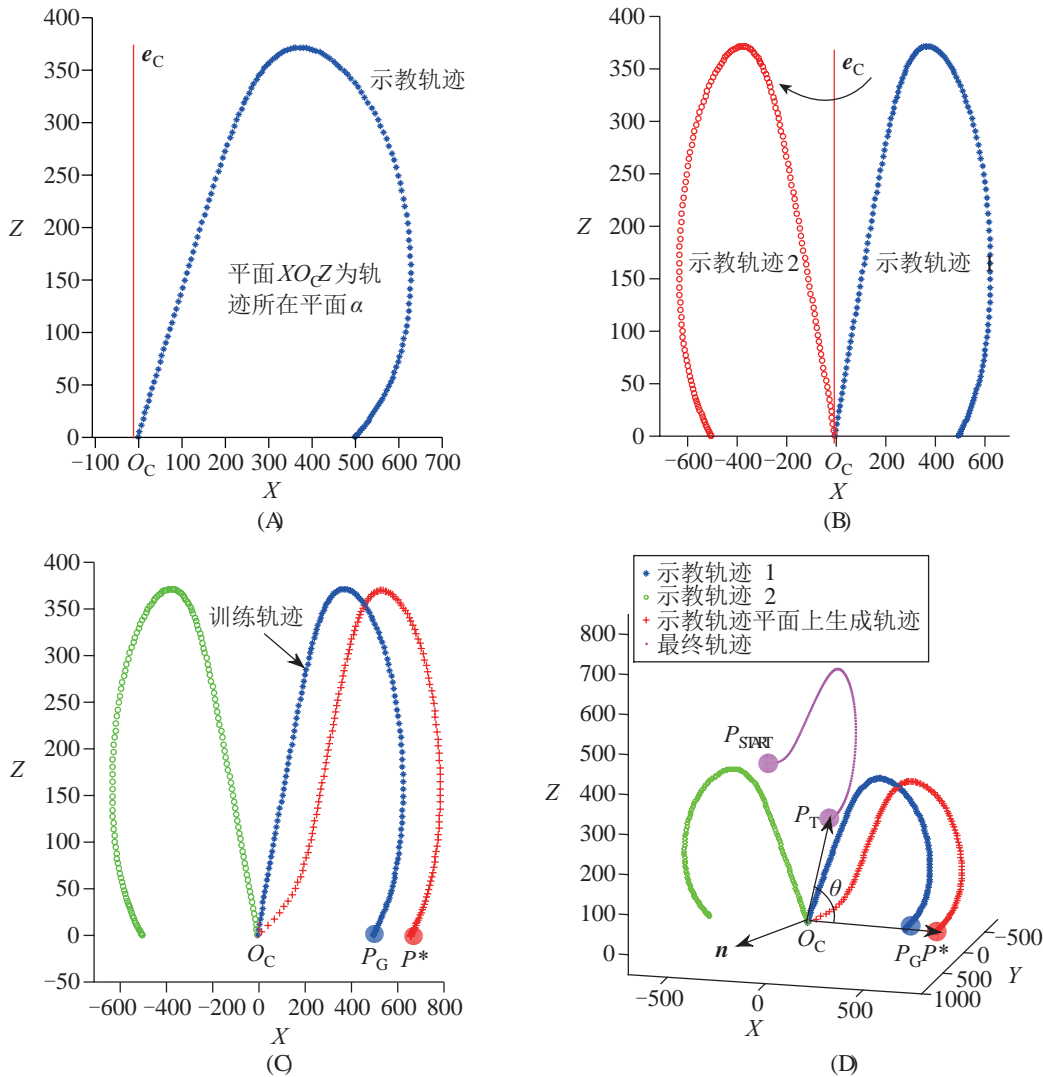


图 3 3 维轨迹生成流程图
Fig.3 Flow diagram of 3D trajectory generation

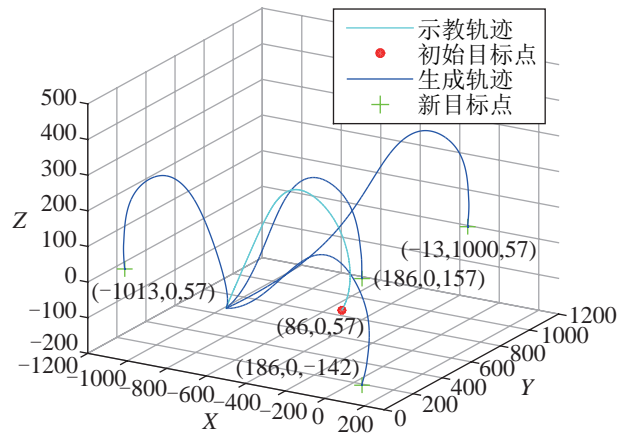


图 4 改进的轨迹生成方法
Fig.4 Improved method for trajectory generation

轨迹生成效果如图 4 所示, 相对基于 DMP 模型的经典轨迹生成方法, 该方法能够在各个方向更稳定地保持示教轨迹的形状特征. 如目标点分别在 Z 轴正、负方向上的生成轨迹形状相似, 在 X 轴和 Y 轴正、负方向上的生成轨迹形状镜像.

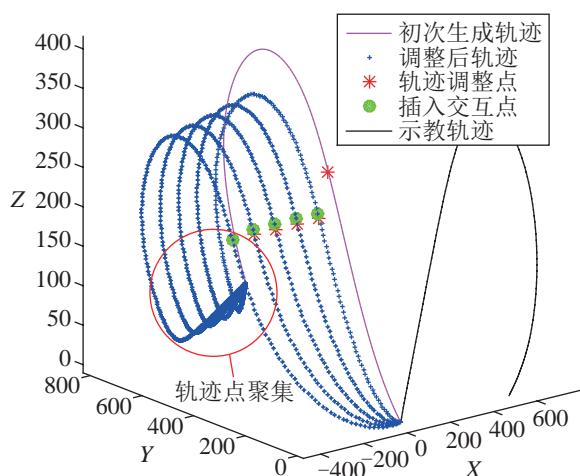
3 人机协作下的轨迹修正 (Trajectory adjustment in human-robot collaboration)

第 2 节介绍了 3 维空间下的轨迹生成. 通过学习操作者示教轨迹形状, 实现根据新目标点生成新轨迹, 从而在一定程度上达到了人机协作的友好性要求. 但面向动态复杂的生活环境, 机器人需要具有灵活的轨迹避障或修正能力来保证操作的高效、

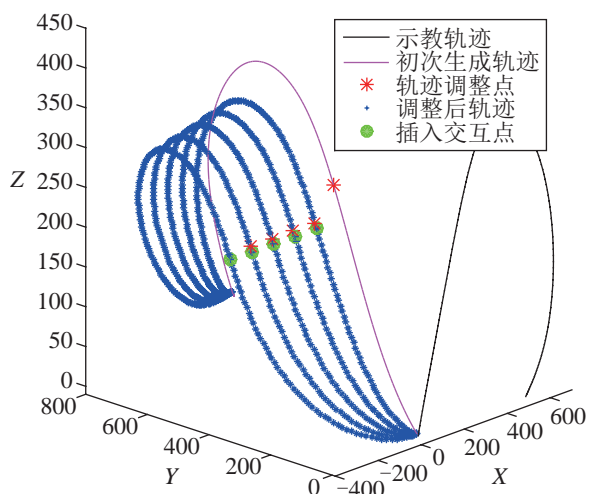
安全.

基于人机协作的思想,在生成轨迹附近加入可调节交互点.依靠直观感觉,操作者可以通过调整交互点的位置,使轨迹远离障碍物,从而辅助机械臂完成障碍物环境下的路径规划.该轨迹调整方法主要分为 3 个过程:

- (1) 调整轨迹点布局,使其分布均匀;
- (2) 在生成轨迹上提取离交互点最近的点,作为调整点,并计算调整点与交互点间距离;
- (3) 基于步骤(2)中调整点与交互点的距离,采用抛物线插值算法实现轨迹的修正.



(A) 轨迹点在目标点处分布密集



(B) 轨迹点在目标点处分布均匀

图 5 轨迹点分布对生成轨迹的影响

Fig.5 Distribution effect on trajectory generation

示教轨迹点通常分布不均匀.若轨迹点分布相对离散,数目少,则轨迹调整快;反之,若轨迹点分布十分密集,数目多,则轨迹调整缓慢,会造成轨迹点聚集的情况,如图 5(a)所示.若在修正轨迹生成前,先对轨迹点的分布进行调整,则生成轨迹

相对平滑,如图 5(b)所示.在图 5 中,插入交互点沿 X 正方向逐次移动 5 次.其中,轨迹调整点是调整前轨迹上距离此刻交互点位置最近的点,点状线为基于该交互点位置修正后的轨迹.

以改变现有轨迹最小化为原则,采用抛物线插值算法求解新轨迹点 $\{p_1^*, \dots, p_i^*, \dots, p_n^*\}$ 与原轨迹点 $\{p_1, \dots, p_i, \dots, p_n\}$ 间的位置增量 $\Delta p_i = [\Delta x_i, \Delta y_i, \Delta z_i]$ 关于下标 i 的函数.增量函数需要满足以下条件:

- (1) 起始点和目标点位置不变,即在起始点和目标点处,增量函数值均为 0.
- (2) 从起始点到调整点,增量函数值的绝对值递增;从调整点到目标点,增量函数值的绝对值递减.

(3) 增量函数平滑.

若用单抛物线插值求解增量函数,则由条件(2)和条件(3)可知,调整点为抛物线的极值点,导数为 0.由条件(1)可知,起始点与目标点具有相同的增量函数值,若调整点不是以上两者的中点,则条件(1)与抛物线的对称性矛盾.所以下面将介绍采用双抛物线插值求解轨迹点增量函数的方法.

若已知抛物线上两点坐标值分别为 (x_1, y_1) 和 (x_2, y_2) ,且其中一点为该函数极值点,以 (x_2, y_2) 为例,则抛物线 $y = ax^2 + bx + c$ 满足方程组(9):

$$\begin{cases} ax_1^2 + bx_1 + c = y_1 \\ ax_2^2 + bx_2 + c = y_2 \\ -b/2a = x_2 \end{cases} \quad (9)$$

其参数由式(10)可得:

$$\begin{cases} a = (y_1 - y_2)/(x_1 - x_2)^2 \\ b = -2x_2(y_1 - y_2)/(x_1 - x_2)^2 \\ c = (x_2^2 y_1 + x_1^2 y_2 - 2x_1 x_2 y_2)/(x_1 - x_2)^2 \end{cases} \quad (10)$$

本文以初始点 $(1, [0 \ 0 \ 0])$ 、目标点 $(183, [0, 0, 0])$ 、调整点 $(62, [-81.338, -49.125, -55.099])$ 为例,其双抛物线插值函数及轨迹修正效果如图 6 所示.其中,1、183、62 分别为起始点、终止点和调整点(极值点)所对应的轨迹点序号,即下标.“[]”中的数值分别是起始点、终止点和调整点轨迹修正前后在 X、Y、Z 三个方向上的轨迹变化量,单位为 mm.从图 6(a)中可以看出,由双抛物线插值法求解的轨迹点增量函数在 X、Y、Z 方向上均满足上述 3 个条件:在起始点和目标点处函数值为 0,调整点对应增量函数极值点;函数连续平滑,以保证生成轨迹连续平滑,如图 6(b)所示,

且保持原有轨迹形状特征。

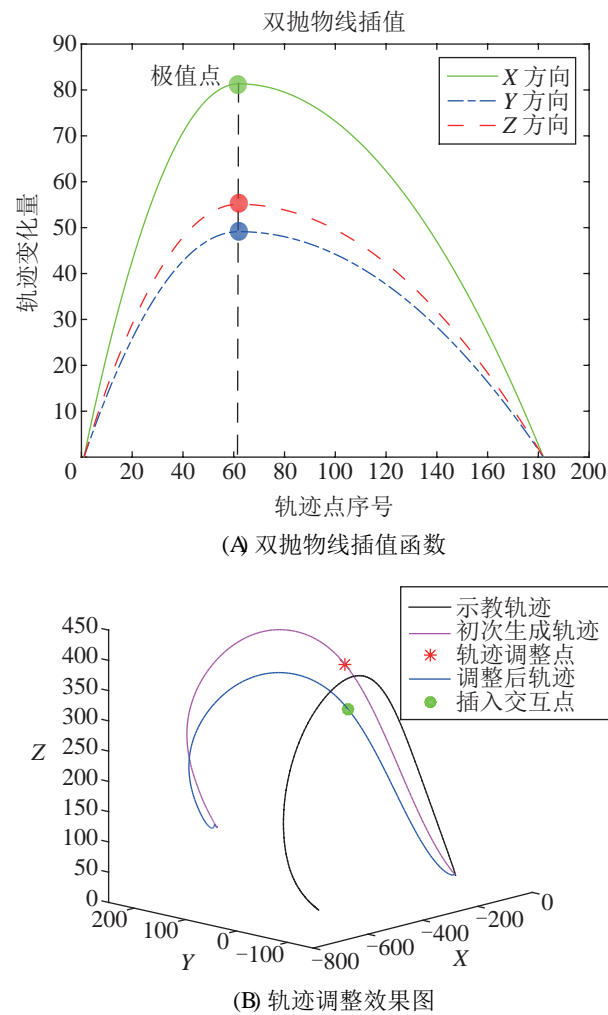


图 6 双抛物线插值
Fig.6 Dual parabolic interpolation

4 避障实验 (Experiments for obstacle avoidance)

4.1 实验平台

3D 体感摄像机 Kinect for Xbox 360, 简称 Kinect, 具有显著的价格优势和强大的人体骨架跟踪 (skeleton tracking) 功能, 常被用来采集操作者的示教动作, 如图 7 所示。

以 7 自由度 Schunk 模块化机械臂为实验平台, 基于 ROS 机器人操作系统, 在仿真环境 Gazebo 中导入真实机械臂模型。通过设置机械臂极限角度、速度、力矩等参数, 其仿真运动过程与真实机械臂一致。在 ROS 系统支持的 3D 可视化工具箱 RVIZ 中, 设计可视化界面, 利用 Interactive Marker^[20] 插件, 通过拖动其移动改变初始点、目标点和插入交互点位置, 从而实现人机协作下的机械臂末端轨迹生成及调整。该实验平台模块间通信机制如图 8 所示。

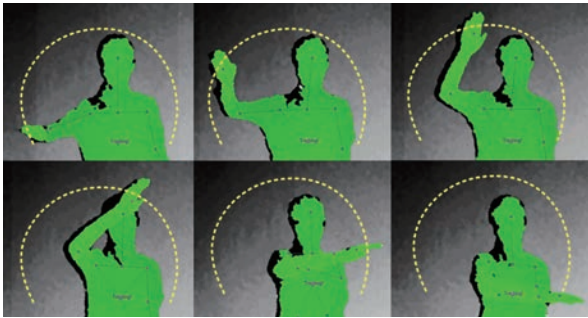


图 7 Kinect 采集的人体示教轨迹
Fig.7 Human demonstration trajectory recorded by Kinect

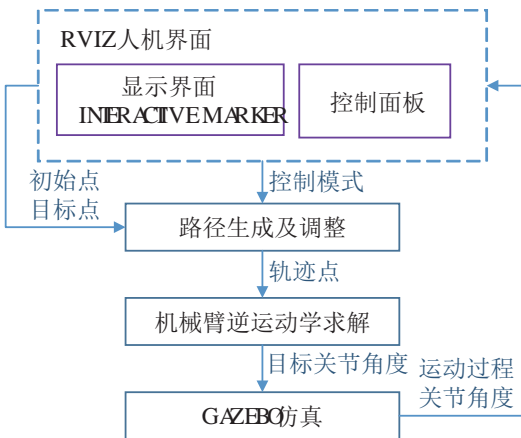


图 8 模块间通信机制
Fig.8 Communication scheme between the modules

4.2 人机交互界面设计

友好的人机交互界面能够保证操作者和机器人之间的顺畅通信, 从而实现两者间的合作并高效地完成任 务。设计的人机交互界面主要分为显示界面和控制面板 2 个部分, 见图 9。显示界面用来显示生成的轨迹和机械臂当前的运动状态。其中, 左侧、中间和右侧球体分别用来表示初始点、插入交互点和目标点的 Interactive Marker, 可沿选中的箭头方向移动。可以通过拖动界面中的 Interactive Marker 或修改控制面板中的参数, 设置或改变轨迹初始点、目标点和插入交互点的位置。末端轨迹控制面板分别由障碍物参数设置、轨迹参数设置、机械臂运动控制 3 部分组成。轨迹参数设置中的 Trajectory Mode 可选择为 2 Points 或 3 Points, 分别对应轨迹生成和轨迹修正 2 种模式。当勾选 Auto Send 时, 系统将以 10 Hz 的频率定时更新 Interactive Marker 的位置信息并发送。否则需要在设置好新的轨迹参数后点击 Send Marker 按钮实现 Interactive Marker 位置信息的更新。若此时轨迹已满足用户需求, 点击机械臂控制中的 Run Trajectory 按钮, 机械臂会从起始点开始沿轨迹运动, 到目标点结束。

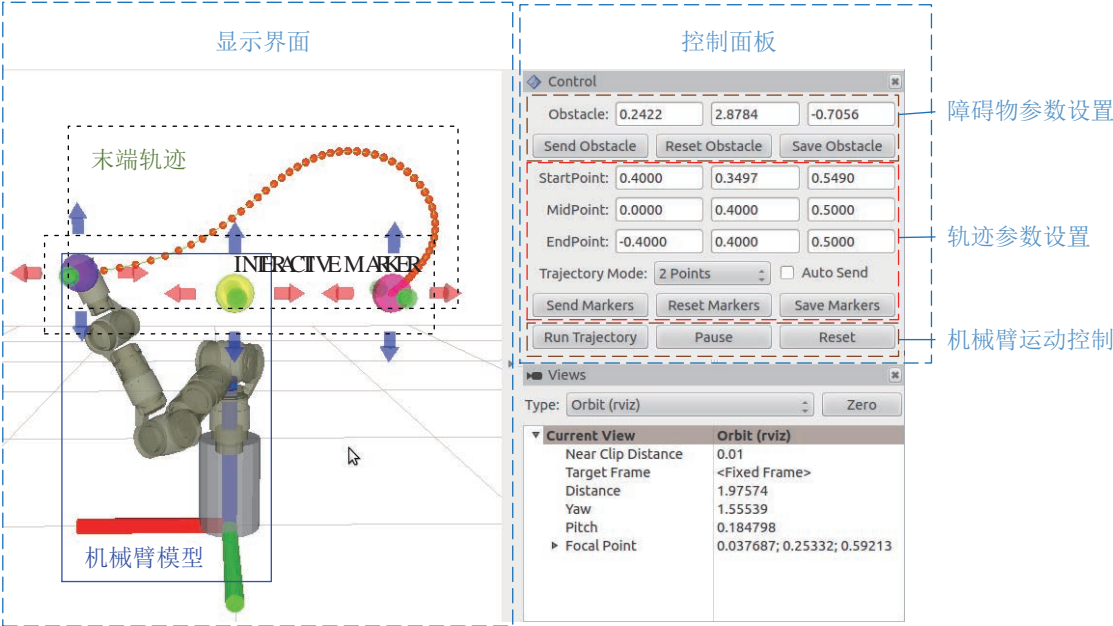


图 9 人机交互界面

Fig.9 Interface for human-robot interaction

4.3 实验

在日常生活环境中，服务机器人的运动轨迹需要具有一定的拟人性，以帮助操作者对机器人动作进行预估。且生成轨迹需要能够进行人为调整以满足不同操作者对轨迹形状的倾向性要求并适应复杂的使用环境。基于人机协作的思想，可通过示教学习来实现机械臂末端轨迹形状与示教者的相似性。并利用人的直观感觉，通过调整插入交互点位置改变轨迹形状，以满足不同的环境要求，从而简化编程过程并提高系统的灵活性。基于上述实验平台及人机交互界面，分别以机械臂在无障碍物和有障碍物的情况下的末端轨迹生成和修正实验，来验证本文方法的直观性和灵活性。并结合已有运动学逆解算法，在仿真环境下执行该运动过程。

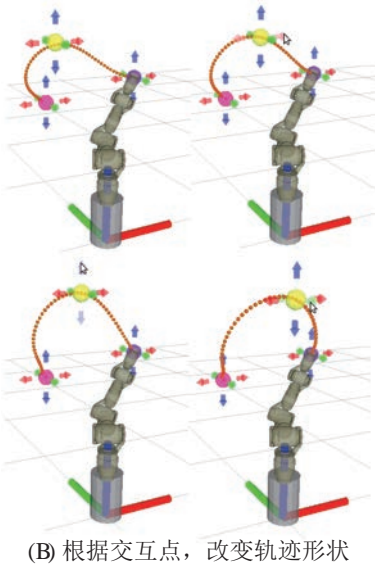
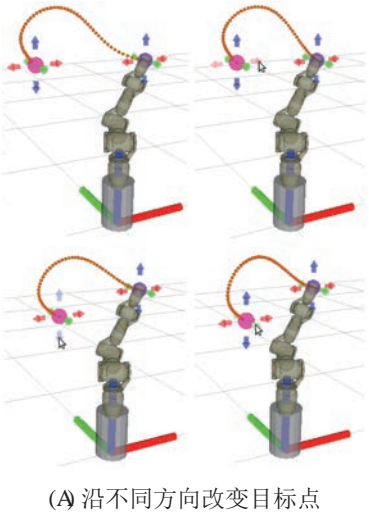


图 10 无障碍物环境下机械臂末端轨迹生成及调整过程
Fig.10 Trajectory generation and adjustment in the environment without obstacles



(A) 沿不同方向改变目标点

图 10 为无障碍物环境下，机械臂末端轨迹的生成和修正过程。由图 10(a) 可知，生成轨迹跟随目标点（左侧球体）位置的移动而变化，且与原轨迹形状相似。图 10(b) 中，通过调整交互点位置（中间球体），操作者可以直观地对轨迹形状进行修正。修正后轨迹平滑且在一定程度上保有原轨迹形状特征。

图 11 为有障碍物情况下机械臂末端轨迹调整过程。将插入交互点移动至要修正的轨迹点附近，该轨迹点可跟随交互点的移动改变位置，并保证轨

迹平滑连续. 从而实现多种障碍物环境下的避障.

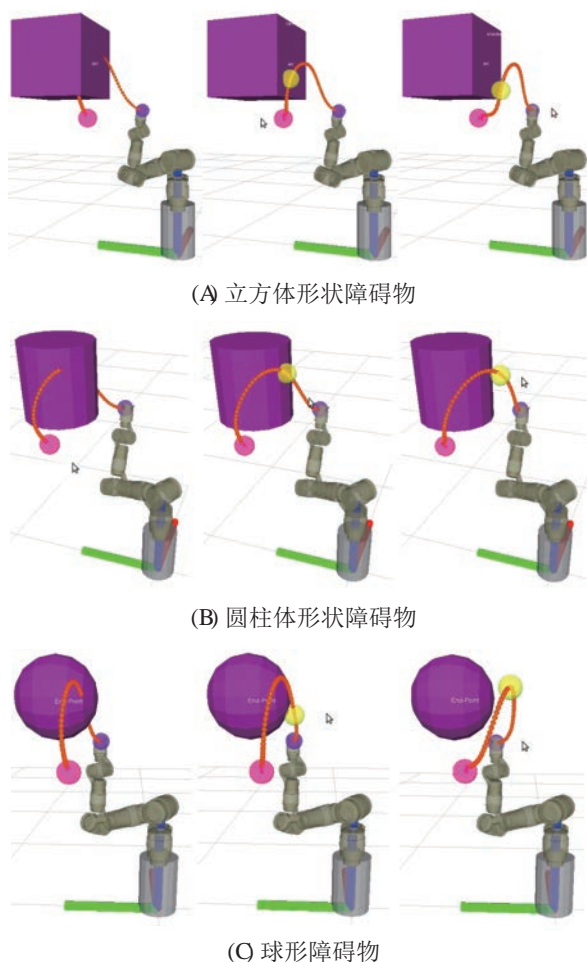


图 11 有障碍物情况下机械臂末端轨迹调整过程
Fig.11 Trajectory adjustment in the environment with obstacles

由图 12 可知, 机械臂能够跟随操作者设计的末端轨迹运动. 从而验证可以通过人机交互界面规划机械臂的实际运动, 该方法具有一定的实用性.

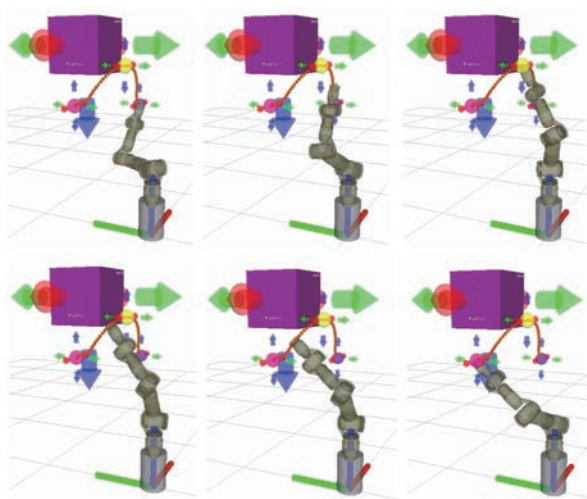


图 12 机械臂沿轨迹运动
Fig.12 Manipulator moves along the trajectory

5 结论 (Conclusion)

针对日常生活中障碍物环境下的机械臂轨迹生成及避障问题, 本文基于 DMP 模型, 提出一种简单有效的机械臂 3 维轨迹生成和修正方法.

值得说明的是:

(1) 本文基于人机协作的思想, 提出了利用人类的直观感觉, 操作者通过虚拟交互界面, 辅助机器人灵活地进行轨迹生成及调整的方法. 一方面简化了系统的整体编程工作, 另一方面提高了系统的控制直观性.

(2) 相对于传统轨迹生成方法, 本文着重于轨迹形状的控制, 使其具有一定的拟人性. 结合机械臂操作任务对轨迹形状的特殊需求, 采用将目标点先降维再旋转的方法生成 3 维轨迹. 生成的轨迹能够在各个方向保持良好的形状特性, 解决了多自由度耦合时产生的轨迹形状畸变问题.

(3) 能够再次调整已生成的轨迹. 通过移动已插入的交互点的位置来改变轨迹形状, 以适应不同的工作环境, 同时保持了轨迹的基本形状特征, 使系统的应用灵活性和实用性得以提高.

参考文献 (References)

- [1] Dragan A D, Srinivasa S S. Familiarization to robot motion[C]//ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction. Piscataway, USA: IEEE, 2014: 366-373.
- [2] Billard A, Grollman D. Robot learning by demonstration [D-B/OL]. (2013-12-10) [2016-03-09]. http://www.scholarpedia.org/article/Robot_Learning_by_demonstration.
- [3] Akgun B, Cakmak M, Yoo J W, et al. Trajectories and keyframes for kinesthetic teaching: A human-robot interaction perspective[C]//ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction. Piscataway, USA: IEEE, 2012: 391-398.
- [4] Kuklinski K, Fischer K, Marhenke I, et al. Teleoperation for learning by demonstration: Data glove versus object manipulation for intuitive robot control[C]//6th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops. Piscataway, USA: IEEE, 2014: 346-351.
- [5] Albrecht S, Ramírez-Amaro K, Weikersdorfer D, et al. Imitating human reaching motions using physically inspired optimization principles[C]//IEEE/RAS International Conference on Humanoid Robots. Piscataway, USA: IEEE, 2011: 602-607.
- [6] Mandery C, Terlemez O, Do M, et al. The KIT whole-body human motion database[C]//17th International Conference on Advanced Robotics. Piscataway, USA: IEEE, 2015: 329-336.
- [7] Kirstein F, Fischer K, Solvason D. Human embodiment creates problems for robot learning by demonstration using a control panel[C]//ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction. Piscataway, USA: IEEE, 2014: 212-213.
- [8] Schaal S. Dynamic movement primitives: A framework for motor control in humans and humanoid robotics[M]. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2006.

- [9] Ilari J, Torras C. 2D path planning: A configuration space heuristic approach[J]. International Journal of Robotics Research, 1990, 9(1): 75-91.
- [10] Rusu R B, Sucan I A, Gerkey B, et al. Real-time perception-guided motion planning for a personal robot[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, USA: IEEE, 2009: 4245-4252.
- [11] Park D H, Hoffmann H, Pastor P, et al. Movement reproduction and obstacle avoidance with dynamic movement primitives with potential field[C]//IEEE/RAS International Conference on Humanoid Robots. Piscataway, USA: IEEE, 2008: 91-98.
- [12] Rai A, Meier F, Ijspeert A, et al. Learning coupling terms for obstacle avoidance[C]//IEEE/RAS International Conference on Humanoid Robots. Piscataway, USA: IEEE, 2014: 512-518.
- [13] Pastor P, Hoffmann H, Asfour T, et al. Learning and generalization of motor skills by learning from demonstration[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, USA: IEEE, 2009: 763-768.
- [14] Fischer K, Jensen L C, Kirstein F, et al. The effects of social gaze in human-robot collaborative assembly[M]//Lecture Notes in Computer Science, vol.9388. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2015: 204-213.
- [15] Ivanisevic I, Configuration V J. Configuration space as a means for augmenting human performance in teleoperation tasks[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B, 2000, 30(3): 471-484.
- [16] 祁若龙, 周维佳, 王铁军. 一种基于遗传算法的空间机械臂避障轨迹规划方法[J]. 机器人, 2014, 36(3): 263-270.
- Qi R L, Zhou W J, Wang T J. An obstacle avoidance trajectory planning scheme for space manipulators based on genetic algorithm[J]. Robot, 2014, 36(3): 263-270.
- [17] Ijspeert A J, Nakanishi J, Hoffmann H, et al. Dynamic movement primitives: Learning attractor models for motor behavior [J]. Neural Computation, 2013, 25(2): 328-373.
- [18] Ijspeert A J, Nakanishi J, Schaal S. Movement imitation with nonlinear dynamic systems in humanoid robots[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, USA: IEEE, 2002: 1398-1403.
- [19] Sorigi L. Two-view geometry estimation using the rodrigues rotation formula[C]//IEEE International Conference on Image Processing. Piscataway, USA: IEEE, 2011: 1009-1012.
- [20] Gossow D, Leeper A, Hershberger D, et al. Interactive markers: 3-D user interfaces for ROS applications[J]. IEEE Robotics & Automation Magazine, 2011, 18(4): 14-15.

作者简介:

刘维惠 (1988 -), 女, 博士生. 研究领域: 机械臂运动控制, 人机协作.

陈殿生 (1969 -), 男, 博士, 教授, 博士生导师. 研究领域: 智能服务机器人, 仿生机器人和机电智能控制.

张立志 (1986 -), 男, 博士生. 研究领域: 移动机器人定位、导航.