

文章编号:1006-2467(2016)09-1348-07

DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2016.09.003

基于谐波轨迹和中枢模式发生器的 工业机器人在线轨迹规划

方 懿, 胡 洁

(上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200240)

摘 要: 针对工业机器人周期性点位重复作业的平滑轨迹和在线变更轨迹要求, 提出了新的关节空间的在线运动轨迹规划方法. 在传统谐波轨迹方法的基础上, 通过引入生物体中用于产生节律活动的中枢模式发生器(CPG)模型, 设计了适用于工业机器人点位往复运动的改进 CPG 网络. 拾放任务作为点位作业的一个典型实例, 被用于证实新方法的有效性. 实验仿真结果表明, 提出的新方法只需求解初始点与终止点的逆运动学, 无需其他附加约束条件即可在笛卡尔空间产生平滑的轨迹并通过 CPG 参数的调整实现稳定的在线轨迹变更, 有效缩短作业时间, 有益于提高生产率.

关键词: 在线轨迹规划; 谐波轨迹; 中枢模式发生器; 拾放任务; 点位运动

中图分类号: TP 242

文献标志码: A

Harmonic Trajectory and CPG-Based Online Trajectory Planning for Industrial Robots

FANG Yi, HU Jie

(School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: A novel online trajectory planning method in joint space was proposed to meet the requirements of smoothness and online trajectory change for repetitive point-to-point (PTP) tasks of industrial robots. Based on the traditional harmonic trajectory method, a modified CPG (central pattern generator) network for cyclic PTP motion of industrial robots was designed by introducing the CPG model, which underlied most rhythmic activities in animal bodies. The pick-and-place task, as a representative example of PTP operations, was used to demonstrate the effectiveness of the novel method. The simulation results show that the proposed method is capable of generating smooth trajectory in Cartesian space without any other additional constraint conditions while only requiring to solve the inverse kinematics of the initial and final points. Furthermore, The proposed model enables stable online trajectory change by simply modulating the CPG parameters, which reduces the operation time and is beneficial to increasing the productive efficiency.

Key words: online trajectory planning; harmonic trajectory; central pattern generator (CPG); pick-and-place task; point-to-point motion

收稿日期:2015-12-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51475288, 51305260, 51275293)

作者简介:方 懿(1992-), 男, 安徽省安庆市人, 博士生, 主要从事工业机器人运动控制研究.

胡 洁(联系人), 男, 教授, 博士生导师, 电话(Tel.): 021-34206552; E-mail: hujie@sjtu.edu.cn.

轨迹规划对提高工业机器人系统的稳定性和可靠性进而提高自动化生产率有着重要意义。对于工业生产中常见的点位重复作业,诸如上下料,搬运,点焊等,目前广泛采用的是传统离线规划方法或其改进形式,包括多项式轨迹,谐波轨迹,指数轨迹等^[1]。穆海华等^[2]总结了3阶轨迹各种情形的特征并建立了预判基准,依据该基准与给定系统约束给出了用于点位运动的3阶轨迹规划精确算法。王建滨等^[3]基于超冗余度机械臂的动力学方程,提出了一种速度和力矩同时约束下的时间最优轨迹规划方法。RYMANSAIB等^[4]通过添加一系列时延3阶指数函数生成梯形速度轮廓的近似值,提出了基于指数函数生成点位轨迹的方法。PERUMAAL等^[5]提出了冲击限制的同步三角S曲线轨迹,实现了障碍物存在环境下操作臂在拾放任务中平滑、最短时间和无碰撞轨迹生成。然而,这些改进方法同传统方法一样,都是根据预定目标点预先规划好轨迹,并不适用于要求在移动中能够即时改变预定轨迹的任务,如果机器人在移动中被要求改变目标点,机器人必须停止运行以重新规划轨迹,这无疑增加了等待和信息处理的时间,延长了工业过程。移动、检查和等待是自动化中主要的非增值步骤,应当被最小化。

本文提出一种用于点位作业的新方法以解决上述问题。新方法基于传统谐波轨迹方法,通过引入生物神经科学领域中枢模式发生器(CPG)的概念,使得在线任务中机器人可在移动过程中即时改变预定轨迹。执行在线轨迹变更时不需求解逆运动学,且不会产生较大冲击,相对于传统方法节约了时间。CPG是生物体中普遍存在的用于产生节律运动协同模式的神经网络,无需来自于感觉反馈或高层控制中心的节律输入即可生成稳定协调的周期性振荡信号,控制如呼吸、咀嚼和行走等机体各部位的节律性运动^[6-7]。从控制学的观点看,CPG是一个内源性的能够节律性应用合适扭矩以获得一个给定移动速度的控制器。它的输出尽管不依赖于高层命令和外部反馈,但后者可以对前者进行调节,并且感觉反馈信号易于被集成到CPG模型中。此外,CPG结构相对简单,具有较强的自适应性和鲁棒性,通过CPG网络耦合方式和相关参数的切换能够实现不同的运动模式。CPG的这些特点使其在机器人系统控制和轨迹生成方面表现出有利一面。

由于CPG的固有特性,使得CPG轨迹生成方法具有类似的性质,包括:① 计算负荷小,有效降低工业成本;② 表现出极限环行为,系统抗扰动能力强;③ 极限环行为存在解析解,具有显式控制参数;

④ 即使在控制参数被突然改变时仍然能够产生平滑轨迹,从而使当前轨迹转变为一个新轨迹^[8]。本文将通过具体应用案例进一步说明这些特性,同时将新方法与传统谐波轨迹进行比较,证实新方法的有效性。

1 基于谐波轨迹的CPG轨迹生成法

1.1 谐波轨迹方法

谐波轨迹是传统的关节空间轨迹规划方法,其特点是加速度曲线与位置曲线成异号的比例关系。基于三角函数的轨迹解析表达式如下:

$$q_i(t) = \frac{h_i}{2} \left[1 - \cos\left(\frac{\pi(t-t_{0i})}{T_i}\right) \right] + q_{0i} \quad (1)$$

式中: $h_i = q_{1i} - q_{0i}$; $T_i = t_{1i} - t_{0i}$; t 为时间变量; t_{0i} 和 t_{1i} 分别为运动起始时刻和到达末端点的时刻; q_{0i} 和 q_{1i} 分别为 t_{0i} 和 t_{1i} 时刻由逆运动学得到的关节 i 角度。轨迹方程各阶导数如下:

$$\left. \begin{aligned} \dot{q}_i(t) &= \frac{\pi h_i}{2T_i} \left[\sin\left(\frac{\pi(t-t_{0i})}{T_i}\right) \right] \\ \ddot{q}_i(t) &= \frac{\pi^2 h_i}{2T_i^2} \left[\cos\left(\frac{\pi(t-t_{0i})}{T_i}\right) \right] \\ \dddot{q}_i(t) &= \frac{\pi^3 h_i}{2T_i^3} \left[\sin\left(\frac{\pi(t-t_{0i})}{T_i}\right) \right] \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

可以看出,谐波轨迹在 (t_{0i}, t_{1i}) 区间上存在任意阶非零连续导数,这意味着在该区间上生成的轨迹充分平滑。其次,谐波轨迹是自然重复的,即具有周期性,允许机器人的执行机构连续地重复相同轨迹,因而适用于典型的工业重复作业,如拾放任务^[1]。此外,谐波轨迹方法仅需要一个连续函数即可实现 A-B-A 这样一个循环轨迹,使用其他方法,如多项式轨迹,往往需要确定2个函数,分别用于定义去程和返回环节。尽管谐波轨迹方法有以上优点,然而也存在不容忽视的缺陷,它的二阶导数,即加速度在 t_0 和 t_1 时刻可能不连续,这意味着在切换轨迹函数变更轨迹时可能会导致加速度的突变,产生较大的瞬时冲击和惯性力,引起机构振动。

1.2 CPG 轨迹生成法

谐波轨迹和其他传统方法均属于离线算法。为确定轨迹函数,首先要定义轨迹的路径点,然后根据这些路径点应满足的已知条件如速度、加速度和连续性等求出运动方程中的具体参数。如果这些条件中有任何一个发生改变,必须重新计算整个轨迹。然而在某些工业应用中,要求具有即时在线轨迹变更或重复轨迹切换的能力,显然在这些在线应用中,谐波轨迹这种离线方法不再适用。

为弥补谐波轨迹方法这一缺陷,本文引入仿生

控制领域中 CPG 这一运动控制机制,与传统谐波轨迹法相结合,得到新的 CPG 轨迹生成法,用于点位运动轨迹生成.建立 CPG 轨迹发生器的首要问题是确定合适的 CPG 控制模型,包括 CPG 网络总体架构、耦合类型和拓扑结构.目前较为普及的 CPG 建模方法是使用耦合非线性振荡器构建动力系统^[9],通过多参数非线性微分方程描述振荡器数学模型.本文中对于驱动关节数为 N 的工业机器人,使用 N 个相位振荡器以最相邻耦合方式组成单链 CPG 网络,每个振荡器对应一个驱动关节,高层控制器根据给定任务作出运动规划,将合适的 CPG 参数作为控制信号输入 CPG 网络,CPG 网络获取参数信号后,经过振荡器的相互耦合作用,输出各关节相应的期望角度信号,并通过 PID 控制器应用合适的力矩驱动各个关节运动,完成相关任务.本文第一个仿真案例中采用二连杆机器人,此时 $N=2$,2 个相位振荡器形成双向激励耦合连接,CPG 控制系统结构如图

1 所示.考虑到机器人结构的相似性以及模型参数的可控制性,用于组成 CPG 网络的振荡器采用文献[10]中提出的可控振幅相位振荡器,该振荡器受七鳃鳗 CPG 启发,最初被用于蛇形机器人的运动控制,这里根据工业机器人点位重复作业轨迹生成的需要,对其作出改进.改进后的数学模型如下:

$$\left. \begin{aligned} \tau \dot{\theta}_i &= 2\pi\nu_i + \sum_{j \in T(i)} r_j w_{ij} \sin(\theta_j - \theta_i - \phi_{ij}) \\ \ddot{r}_i &= a_i \left(\frac{a_i}{4} (R_i - r_i) - \dot{r}_i \right) \quad i = 1:N \\ x_i &= r_i [1 - \cos(\theta_i)] + x_{0i} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中:状态变量 θ_i 和 r_i 分别为第 i 个振荡器的相位和振幅;参数 ν_i 和 R_i 分别为固有频率和振幅,决定了 CPG 的极限环; a_i 为与极限环收敛速度相关的正常数.振荡器之间的耦合由权重 w_{ij} 和相位偏置 ϕ_{ij} 确定.振荡器 i 接收来自离散拓扑集 $T(i)$ 中振荡器的输入耦合,在偏置角度 x_{0i} 的基础上产生节律输出信号 x_i .

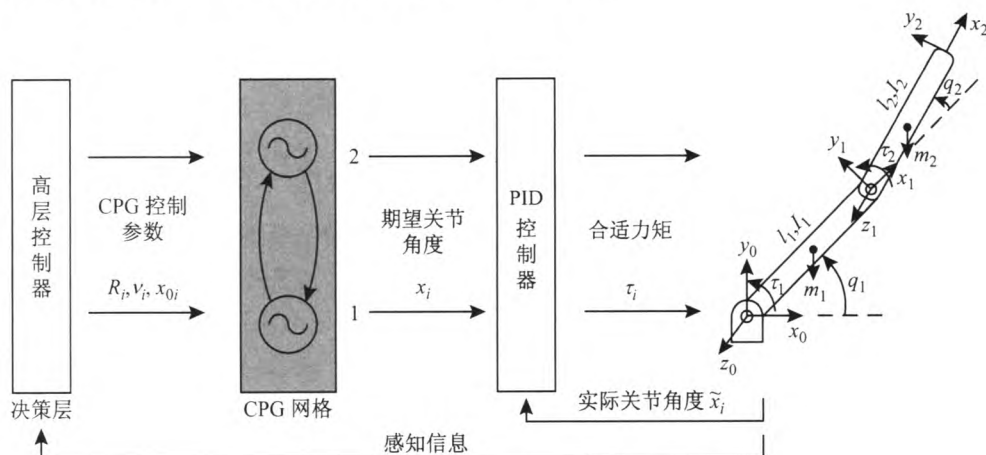


图 1 二连杆机器人 CPG 控制系统结构

Fig. 1 Structure of CPG control system for two-link manipulator

式(3)中包含 2 个微分方程:第 1 个微分方程决定了相位 θ_i 的时间演化,如果耦合权重 w_{ij} 相对于固有频率 ν_i 之间的差值足够大,耦合振荡器将以相同频率和恒定相位间隔同步(锁相和锁频),此时将产生平稳的输出,振荡器间的相位间隔取决于 ϕ_{ij} 、 w_{ij} 、 ν_i 和 R_i . 同时为满足该限制条件,引入参数 τ 以同时控制参数 w_{ij} 和 ν_i ,使得两者保持在合适的范围内,且不影响输出的相位锁定和收敛速度;第 2 个微分方程是二阶线性微分方程,确保振幅 r_i 以快速抑制的方式平滑地趋近于 R_i , a_i 值越大,收敛速度越快,但由此引起的冲击也更大.式(3)中最后一个方程为振荡器输出方程,输出值即为振荡器 i 对应机器人关节的期望角度,通过参数 R_i 、 ν_i 和 x_{0i} 的调整实现与期望轨迹的匹配.稳态时输出角度为

$$x_{i, \text{稳}} = R_i [1 - \cos(2\pi(t - t_{0i}))] + x_{0i} \quad (4)$$

与谐波轨迹的形式一致.

一旦建立了 CPG 轨迹发生器的控制模型,接下来的关键步骤是设定 CPG 参数以生成期望轨迹.其中, τ 、 w_{ij} 、 ϕ_{ij} 和 a_i 均为恒定常数,根据实际需求选取.为对 CPG 输出产生影响, τ 的值应当 ≤ 1 ,当 $\tau > 1$ 时,会使输出性能恶化;决定振荡器间耦合强度的 w_{ij} 相对于固有频率差必须足够大以实现振荡器同步;相位偏置 ϕ_{ij} 设为零以保证各振荡器之间不存在相位差,对于工业机器人应用而言零值的实际意义是各电机能够在同一指定时刻开始它们的期望运动; a_i 值的设定需在收敛速度与最大冲击之间取得一个平衡.综上,本文中选择: $\tau=1$, $w_{ij}=6$, $\phi_{ij}=0$, $a_i=8$.

另外 3 个参数 R_i 、 ν_i 和 x_{0i} 是 CPG 的控制参数,高层控制器通过调整控制参数实现输出波形的转

变. 目前存在多种调整 CPG 控制参数的优化方法, 如遗传算法等^[11], 然而这些方法往往计算量较大, 本文采用一种相对简便高效的方法确定参数. 考虑到 CPG 轨迹方法是基于谐波轨迹的形式, 因此将 CPG 的稳定输出, 即式(4)与传统谐波轨迹表达式(1)直接进行比较, 可以直观地获取参数. 不难得到:

$$R_i = h_i/2, \quad \nu_i = 1/(2T_i), \quad x_{0i} = q_{0i} \quad (5)$$

这样, 类似于谐波轨迹方法, 对于笛卡尔空间中两点间的轨迹规划, 通过逆运动学求出机器人初始位姿和期望末端位姿对应的关节角, 根据设定的运动周期, 即可获取相应的 CPG 轨迹控制参数. 然而与谐波轨迹法不同的是, 预先将各段轨迹的 CPG 参数存储到高层控制器, 在机器人运作过程中, 可依据任务需求实时切换 CPG 参数实现在线轨迹平滑变更, 无需停下来求解变更点的关节量进行重新规划.

2 CPG 轨迹规划的工程应用

2.1 多路径/多目标点任务的应用

首先考虑一个包含多个目标点的离线应用案例, 通过该案例将 CPG 轨迹方法与谐波轨迹法进行比较, 以证实使用 CPG 作为轨迹生成器相对于传统方法的优越性, 并简要说明谐波方法和 CPG 方法的相似点和差异. 所有的仿真在 Matlab 软件的 SimMechanics 工具箱中实现.

考虑图 1 中的二连杆机器人, 假定连杆是细长刚性的, 连杆长度 $l_1=l_2=0.43\text{ m}$, 质量 $m_1=5\text{ kg}$, $m_2=4\text{ kg}$. 仿真模型如图 2 所示. 机器人首先拾取位置 $A=\{0.4\text{ m}, 0.5\text{ m}\}$ 处的一个零件, 将它传送至位于 $B=\{-0.4\text{ m}, 0.3\text{ m}\}$ 处的 1 号机器再返回 A 处. 接着在 A 点处拾取其他零件并传送至 $C=\{-0.4\text{ m}, 0.7\text{ m}\}$ 处的 2 号机器, 每一段单程路径均耗时 8 s, 如图 3 所示. 整个过程存在 2 个不同的路径, 即路径 A-B-A 和路径 A-C-A.

2 段路径分别对应一组轨迹参数, 谐波轨迹和 CPG 轨迹参数的找寻方法实质是相同的. 首先求解机器人逆运动学, 确定路径点 A、B、C 的关节角. 二连杆机器人的运动学逆解如下^[12]:

$$\left. \begin{aligned} c_2 &= \frac{x^2 + y^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1l_2}, \quad s_2 = \sqrt{1 - c_2^2} \\ q_2 &= \text{Atan2}(s_2, c_2) \\ k_1 &= l_1 + l_2c_2, \quad k_2 = l_2s_2 \\ q_1 &= \text{Atan}2(y, x) - \text{Atan}2(k_2, k_1) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

由式(6)易求得 $A=\{q_1=0.165\text{ 1 rad}; q_2=1.461\text{ 9 rad}\}$, $B=\{q_1=1.547\text{ 7 rad}; q_2=1.900\text{ 7 rad}\}$ 和 $C=$

$\{q_1=1.734\text{ 4 rad}; q_2=0.711\text{ 0 rad}\}$. 接着通过前述定义即可确定关节 1 和 2 的谐波轨迹和 CPG 参数, 如表 1 和 2 所示.

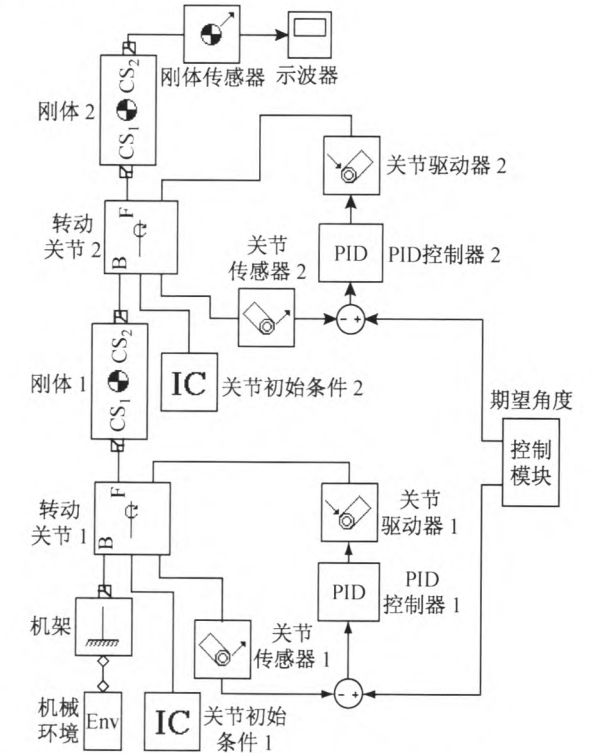


图 2 机器人 SimMechanics 仿真模型
Fig. 2 SimMechanics simulation model of robot

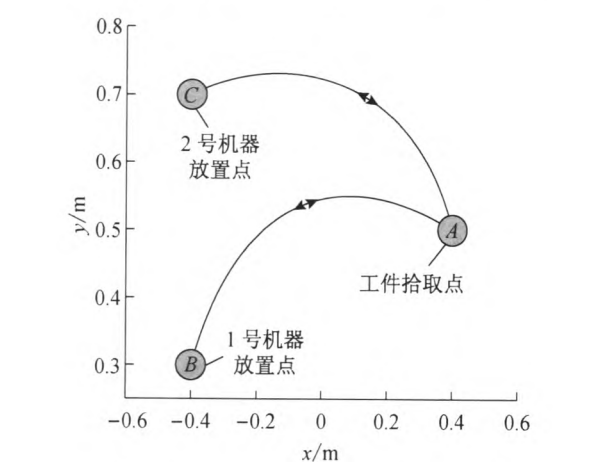


图 3 离线拾放作业机器人空间轨迹示意图
Fig. 3 Expression of space trajectory of robot for offline pick-and-place task

表 1 谐波轨迹参数				
Tab. 1 Parameters of harmonic trajectory				
路径	关节	h_i/rad	T_i/s	t_{0i}/s
AB 段	1	1.382 6	8	0
	2	0.438 8	8	0
AC 段	1	1.569 3	8	16
	2	-0.750 9	8	16

表 2 CPG 轨迹控制参数
Tab. 2 Control parameters of CPG trajectory

路径	关节	R_i/rad	ν_i/s^{-1}	x_{0i}/rad
AB 段	1	0.691 3	0.062 5	0.165 1
	2	0.219 4	0.062 5	1.461 9
AC 段	1	0.784 7	0.062 5	0.165 1
	2	-0.375 5	0.062 5	1.461 9

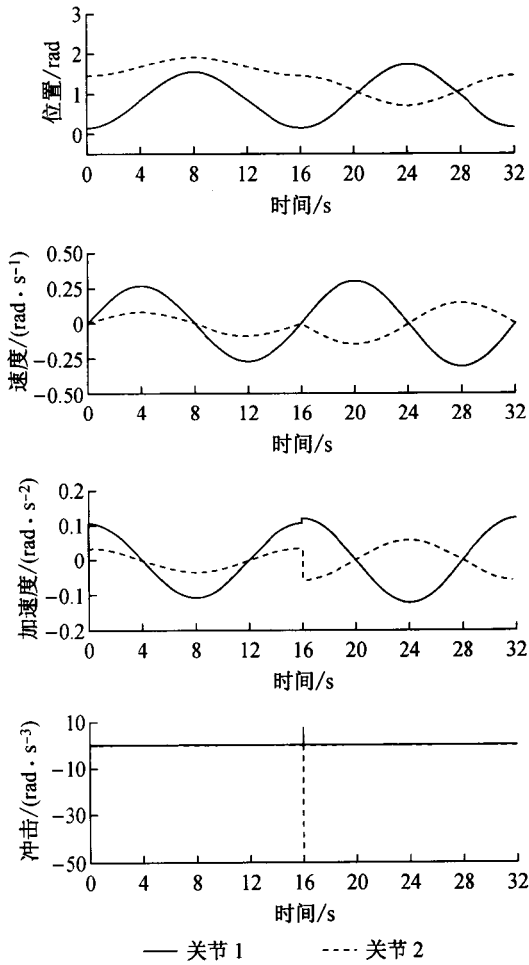


图 4 案例 1 谐波轨迹位置、速度、加速度和冲击曲线
Fig. 4 Position, velocity, acceleration and jerk of harmonic trajectory in case study 1

$$q_2(t) = \begin{cases} 0.219\,4\left[1 - \cos\left(\frac{\pi t}{8}\right)\right] + 1.461\,9 & 0 \leq t \leq 16 \\ -0.375\,5\left[1 - \cos\left(\frac{\pi t}{8} - 2\pi\right)\right] + 1.461\,9 & 16 \leq t \leq 32 \end{cases}$$

尽管在这个案例中将轨迹表达式写成了一个分段函数的形式,但实质上有 2 个作为轨迹的谐波函数,分别实现 AB 段和 AC 段路径之间的移动. 轨迹转变于 16 s 时在点 A 发生. 仿真曲线如图 4 所示.

注意到在 16 s 时发生了加速度的突变,引起了

2.1.1 谐波轨迹 将表 1 中的参数代入式(1),得到用于该任务的谐波轨迹方程式为如下分段函数:

$$q_1(t) = \begin{cases} 0.691\,3\left[1 - \cos\left(\frac{\pi t}{8}\right)\right] + 0.165\,1 & 0 \leq t \leq 16 \\ 0.784\,7\left[1 - \cos\left(\frac{\pi t}{8} - 2\pi\right)\right] + 0.165\,1 & 16 \leq t \leq 32 \end{cases}$$

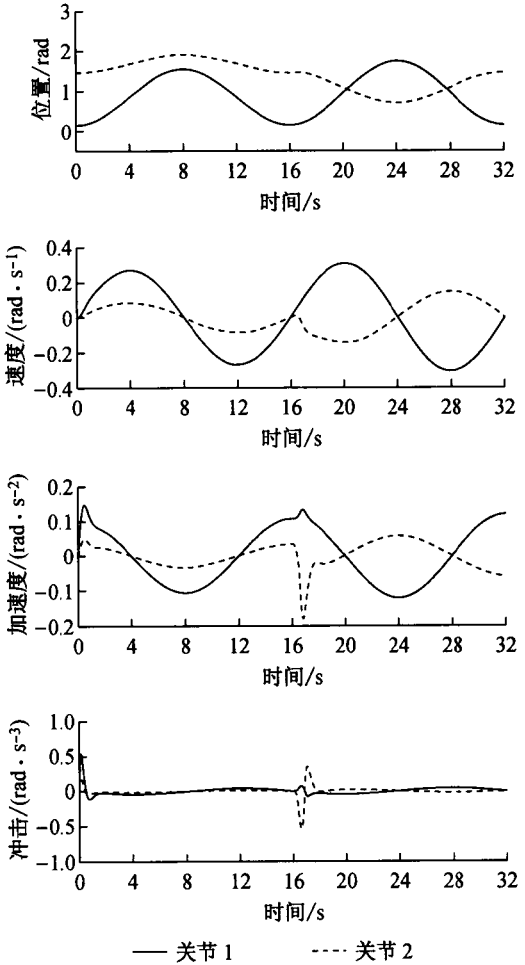


图 5 案例 1 CPG 轨迹位置、速度、加速度和冲击曲线
Fig. 5 Position, velocity, acceleration and jerk of CPG trajectory in case study 1

一个较大的冲击 -45.9 rad/s^3 . 这与 1.1 节中所述谐波轨迹性质相吻合,即轨迹转变点的平滑连续性无法保证. 此外,在运动初始阶段也存在较大冲击,这是由于谐波轨迹初始加速度不为零,机器人在零时刻由静止转为运动状态需要较大的力矩,使用 CPG 轨迹执行该任务可以避免这一缺陷.

2.1.2 CPG 轨迹 高层控制器通过改变 CPG 参数实现轨迹的切换. 初始时应用 AB 段对应 CPG 参数实现 A-B-A 路径,在 16 s 时刻当机器人位于 A 点时切换为 AC 段对应 CPG 参数,完成剩余的 A-

C-A 路径. 仿真结果如图 5 所示.

由于 CPG 的极限环收敛性质,有效避免了谐波轨迹运动初始时刻非零加速度导致的冲击. 另外需要注意不同于谐波轨迹,每个关节的 CPG 轨迹为单一连续函数,因此尽管 CPG 方法和谐波方法一样,没有在轨迹变更点使用平滑连续性条件,然而由图 5 曲线可以看出,转变点处的加速度和冲击都是连续的,最大冲击值仅为 -0.54 rad/s^3 ,远小于谐波轨迹.

本案例考虑了离线节律轨迹生成的任务. 对于这种轨迹,CPG 和谐波方法都可以被应用. 然而 CPG 方法由于无附加条件的平滑连续性,相对更加优良. 下个案例将进一步讨论 CPG 方法的其他优势.

2.2 在线轨迹/目标点变更任务的应用

考虑图 6 所示的拾放作业案例:机器人最初位于 A 点,计划在 A 点抓取一个零件然后根据机器的可利用性移动零件至 B 点的机器 1 或 C 点的机器 2 处. 在运动的初始阶段认为 B 点的机器 1 是可用的,因而机器人向 B 点运动. 然而在向 B 点移动过程中,大约 3 s 后,当机器人位于 D 点时,高层控制器认识到机器 1 正忙而机器 2 可用,因此机器人需要改变原轨迹转而向 C 点运动,最后返回 A 点. 这是一个在线应用任务,若应用谐波轨迹,为生成由 D 点至 C 点的运动轨迹,需首先在 D 点停止运动,求解 D 点的逆运动学,再根据 D 点和 C 点相应的关节量对轨迹进行重新规划,如果此任务要求轨迹即时在线变更,则谐波方法不再适用,然而本文提出的 CPG 方法可以实现该任务.

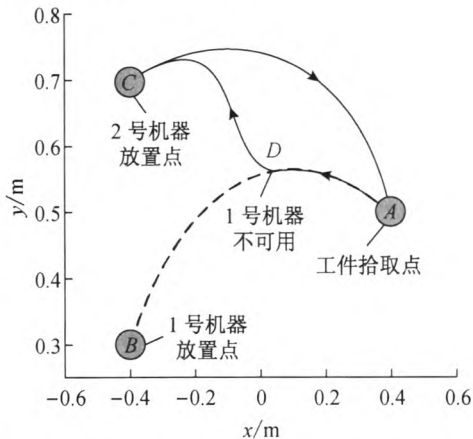


图 6 在线拾放作业机器人空间轨迹示意图
Fig. 6 Expression of space trajectory of robot for online pick-and-place task

本例采用 UR5 机器人参数进行仿真,由于执行任务为平面运动,因此仅考虑 3 根连杆和相应关节,

其中 $l_1 = 425.00\text{ mm}$, $l_2 = 392.25\text{ mm}$, $l_3 = 94.66\text{ mm}$. 假定末端执行器在 A、B 和 C 点处的姿态分别为 0.65 、 2.4 和 1.9 rad ,和上一案例类似,首先由 A、B 和 C 对应的关节角度预先导出 AB 段和 AC 段的 CPG 参数. 任务中最初应用 AB 段 CPG 参数使得机器人向 B 点移动,在第 3 s 时刻机器人位于 D 点时改变 CPG 参数以移动零件至 C 点的可用机器,与传统方法不同,CPG 方法无需在转变点 D 停止运动以求解 D 点关节量即可在轨迹之间实现切换,自动生成新的轨迹,使得机器等待时间最小化. 这是 CPG 方法的一个重要优势,同样与 CPG 的极限环特性有关,通过简单地改变 CPG 参数可实现从一个极限环到另一个极限环. 本例中由 A 到 B 和由 A 到 C 分别存在一个极限环,在转变点 D 处 A-B 极限环参数,即 CPG 参数,被变更为 A-C 极限环参数,那么 D 点将被视作 A-C 极限环的初始点,从而在 D 点机器人轨迹被吸引至 A-C 轨迹.

仿真结果如图 7 所示,轨迹被成功改变,机器人到达 C 点后返回 A 点,中途没有停顿. 可以观察到

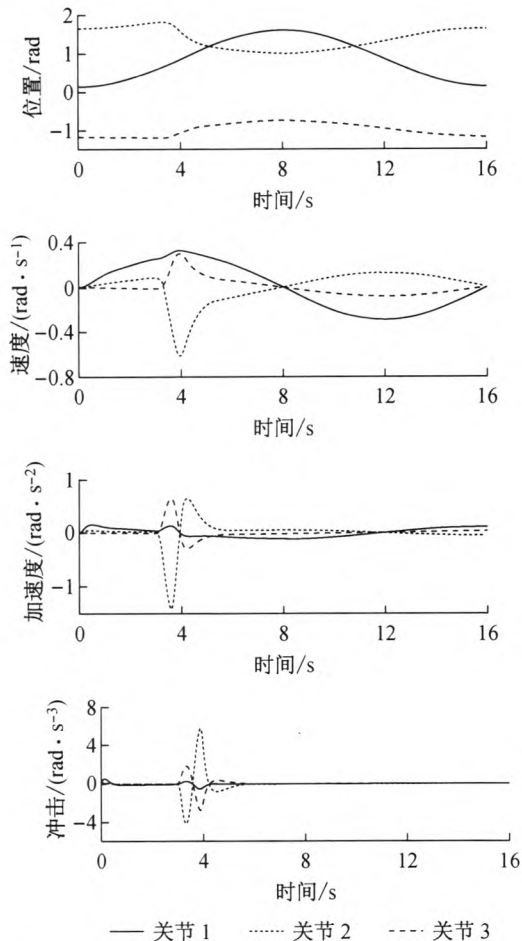


图 7 案例 2 CPG 轨迹位置、速度、加速度和冲击曲线
Fig. 7 Position, velocity, acceleration and jerk of CPG trajectory in case study 2

加加速度和冲击是连续的,轨迹转变时最大冲击仅为 5.93 rad/s^3 , 因此轨迹的改变充分平滑. 另外, 注意到在连杆数较多的情况下, 由于各关节参数值变化量可能存在较大差异, 因而引起的冲击值也相差较大, 实际应用时应当根据最大的关节和冲击限制对 CPG 参数作出相应调整.

3 结 语

本文提出了用于工业机器人点位节律运动的在线轨迹生成方法. 在谐波方法的基础上, 引入生物体中负责节律运动的 CPG, 根据工业机器人特性设计了改进的 CPG 模型用于轨迹生成和调整. 改进的 CPG 工程模型使用微分方程形式的耦合振荡器网络, 并添加附加参数实现了 CPG 输出频率与平滑性的同时控制. 与传统轨迹生成方法不同, 新方法允许轨迹参数的在线调整而不会引起较大冲击. 通过 2 个拾放任务的工程案例证实了新方法的有效性, 仿真结果显示生成的轨迹在速度、加加速度和冲击上都是连续的. 这种方法与传统的谐波轨迹方法相比较, 2 种方法都需要端点或其他预设点的运动学反解, 然而 CPG 方法消除了轨迹中间点变更轨迹时求解逆运动学问题的必要性, 无需停止运动对轨迹进行重新规划, 从而减少机器的等待时间, 提高了生产率.

参考文献:

- [1] BIAGIOTTI L, MELCHIORRI C. Trajectory planning for automatic machines and robots[M]. Berlin Heidelberg: Springer Science & Business Media, 2008.
- [2] 穆海华, 周云飞, 严思杰, 等. 超精密点对点运动 3 阶轨迹规划算法与实现[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2007, 35(12): 58-61.
MU Haihua, ZHOU Yunfei, YAN Sijie, *et al.* Third-order profile planning algorithm and implementation for high accuracy point-to-point motion[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science Edition)*, 2007, 35(12): 58-61.
- [3] 王建滨, 马培荪, 徐 军, 等. 基于超冗余度机械臂动力学的时间最优轨迹规划[J]. 上海交通大学学报, 2002, 36(9): 1360-1364.
WANG Jianbin, MA Peisun, XU Jun, *et al.* Time optimal trajectory planning of hyper redundant manipulator taking its dynamics into account [J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2002, 36(9): 1360-1364.
- [4] RYMANSAB Z, IRAVANI P, SAHINKAYA M N. Exponential trajectory generation for point to point motions[C]//*IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*. Wollongong, Australia: IEEE, 2013: 906-911.
- [5] PERUMAAL S S, JAWAHAR N. Automated trajectory planner of industrial robot for pick-and-place task[J]. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2013, 10(10): 1-17.
- [6] 周守信. 中枢模式发生器在机器人控制领域的应用[J]. 中国高新技术企业, 2013(2): 62-64.
ZHOU Shouxin. The application of CPG in robot control field [J]. *China High-Tech Enterprises*, 2013 (2): 62-64.
- [7] DING R, YU J, YANG Q, *et al.* Dynamic modelling of a CPG-controlled amphibious biomimetic swimming robot[J]. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2013, 10(3): 493-501.
- [8] CRESOPI A, IJSPEERT A J. Online optimization of swimming and crawling in an amphibious snake robot [J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2008, 24(1): 75-87.
- [9] YU J, TAN M, CHEN J, *et al.* A survey on CPG-inspired control models and system implementation [J]. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2014, 25(3): 441-456.
- [10] CRESPI A, KARAKASILIOTIS K, GUIGNARD A, *et al.* Salamandra robotica II: An amphibious robot to study salamander-like swimming and walking gaits[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2013, 29 (2): 308-320.
- [11] STAFFA M, PERFETTO D, ROSSI S. Engineering central pattern generated behaviors for the deployment of robotic systems[J]. *Neurocomputing*, 2015, 170(2): 98-112.
- [12] CRAIG J J. Introduction to robotics: mechanics and control[M]. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall, 2005.