

考虑关节限位的冗余度机器人重复性路径规划研究^①贾庆轩^② 吴楚锋^③ 陈 钢 孙汉旭

(北京邮电大学自动化学院 北京 100876)

摘 要 针对冗余度机器人末端执行封闭轨迹任务时关节角度漂移问题,提出了一种考虑关节限位的重复性路径规划方法。基于梯度投影法,提出重复运动优化算子,并将其引入到冗余度机器人伪逆运动方程中,实现冗余度机器人无漂移重复运动;通过设计平滑因子,提出了改进的回避关节极限方法,并将该方法融入到机器人重复运动规划方程中,实现了考虑关节限位的重复性路径规划。利用数值仿真实验,与现有的相关方法进行比较,验证了提出算法的正确性和有效性;通过 8 自由度机器人平台验证了考虑关节限位的重复性路径规划方法的实用性。

关键词 冗余度机器人, 梯度投影法, 重复运动算子, 关节极限

0 引 言

机器人完成某一操作任务时,不仅要求其末端位姿复位到初始状态,而且需要各关节角度返回到初始特定构型,为后续操作任务做准备。为了满足该任务要求,通常机器人完成操作任务后会进行复位操作,任务操作和复位操作会使机器人末端运行轨迹构成一条封闭曲线。当完成封闭轨迹操作任务时,非冗余度机器人构型同时返回到初始特定构型;而冗余度机器人的最终构型与初始特定构型存在偏差,为此需要针对冗余度机器人开展重复性路径规划研究。所谓冗余度机器人重复性路径规划是指针对机器人执行末端封闭路径重复作业任务,求解一组机器人关节角度序列,使得机器人关节运行轨迹封闭。

国内外学者已针对冗余度机器人路径规划重复性问题开展了相关研究。Klein^[1,2]最早研究了冗余机器人重复性问题,利用节距与弧长进行预测关节角度漂移及其漂移极限。Shamir^[3]通过雅可比矩阵伪逆可积曲面的存在条件分析了冗余度机器人伪逆控制的重复性问题,并利用李括号(LBC 条件)判定伪逆控制重复性是否存在。上述方法只适用判别重

复性是否存在,不能从根本上解决重复性路径规划问题。Chevallereau^[4]利用分解法,将雅可比矩阵分解为两部分来求解机器人运动学逆解,避免对雅可比矩阵伪逆的求解,进而为重复性路径规划提供理论依据;Baillieul^[5]利用扩展空间法,即扩展任务空间维数,使得雅可比矩阵为方阵,将问题转化为非冗余机器人进行求解。这两种方法推导、计算复杂,特别是对自由度较多的机器人,这些问题更为突出。赵京^[6]提出了重置初值法解决冗余度机器人的重复性问题。张雨浓^[7-9]提出了基于原对偶神经网络求解冗余度机器人重复运动的问题。该方法计算复杂度高,耗时较长,不适合于实时运算求解。考虑到实际的冗余机器人受连杆干涉、关节运行范围等因素的限制,机器人各关节转角均应处于一定的运行范围之内,即存在关节运行极限。为了实现冗余度机器人重复路径规划,本文在冗余度机器人伪逆法的基础上,引入了重复运动优化算子,实现了冗余度机器人的重复路径规划。同时,为了保证重复路径规划过程中,机器人关节运行不超出其极限位置,在机器人运动学方程中采用任务分配理论将重复运动优化算子与回避关节极限优化算子融合。最后,利用 8 自由度模块化机器人对本文提出的考虑关节极限的冗余度机器人重复运动规划算法进行了验证。

① 863 计划(2011AA7044027),国家自然科学基金(61175080)和中央高校基本科研业务费专项资金(BUPT2011rc0026)资助项目。

② 男,1964 年生,博士,教授;研究方向:先进机器人技术,虚拟现实技术;E-mail: qingxuan@bupt.edu.cn

③ 通讯作者,E-mail: wuchufeng@bupt.edu.cn

(收稿日期:2012-06-28)

1 冗余度机器人重复运动规划

1.1 冗余度机器人一般逆解

根据冗余机器人的逆运动学方程^[10],机器人末端速度和关节速度之间的关系为

$$\dot{q} = J^+ \dot{p} + (I - J^+ J) \alpha \quad (1)$$

其中, $\dot{p} \in R^m$, $\dot{q} \in R^n$, $J \in R^{m \times n}$ 分别是机器人操作的末端速度、关节速度和机器人雅可比矩阵, J^+ 是雅可比矩阵的 Moore-Penrose 广义逆, I 为 n 维单位矩阵, $\alpha \in R^n$ 是任意矢量, $J^+ \dot{p}$ 是方程的最小范数解, $(I - J^+ J) \alpha$ 是方程的齐次解。齐次解对应机器人操作臂的自运动,不会引起机器人任何末端运动。

因此通过选择不同的优化向量 α , 可以实现机器人避障、避奇异和避关节极限等性能指标。通常机器人运行过程中需要同时满足多个约束指标,因此需要同时选取不同优化指标,并将其以一定的融合方式进行合并。常采用加权组合方式的融合方法^[11]:

$$\alpha = \gamma_1 \cdot \alpha_1 + \gamma_2 \cdot \alpha_2 + \cdots + \gamma_k \cdot \alpha_k \quad (2)$$

其中, k 为性能指标的总个数, $\alpha_1, \dots, \alpha_k$ 为性能指标优化算子, $\gamma_1, \dots, \gamma_k$ 为各优化算子对应的权值系数,通过改变 $\gamma_1, \dots, \gamma_k$ 可调节各性能指标在整体优化中的权重。

1.2 重复运动优化算子

为了保证机器人在执行末端封闭轨迹任务时,机器人终止时刻关节角度能够回到初始关节角度,本文以当前所有关节角度与初始关节角度差值的平方和作为重复运动优化目标函数。以 n 自由度机器人为例,重复运动优化目标函数为

$$H_R(\theta) = \rho_R \sum_{i=1}^n \frac{(\theta_{\text{now}}(i) - \theta_{\text{init}}(i))^2}{2} \quad (3)$$

其中, $\theta_{\text{now}}(i)$ 为机器人 i 关节当前时刻角度值, $\theta_{\text{init}}(i)$ 为机器人 i 关节初始关节角度, ρ_R 为权值系数,选择不同的 ρ_R 将影响优化算子在逆解中的权重。

为了将重复运动优化函数引入到机器人运动学逆解中,本文采用梯度投影法建立优化函数,作为机器人最小范数速度的优化项。对式(3)进行求导,可以得到

$$\alpha_R(\theta) = \rho_R \left\{ \frac{\partial H_R(\theta)}{\partial \theta_1}, \frac{\partial H_R(\theta)}{\partial \theta_2}, \dots, \frac{\partial H_R(\theta)}{\partial \theta_n} \right\} \quad (4)$$

其中, $\frac{\partial H_R(\theta)}{\partial \theta_i} = (\theta_{\text{init}}(i) - \theta_{\text{now}}(i))$ 。

将式(4)表达的机器人重复运动优化算子代入到式(1)中,便可得到冗余度机器人重复运动路径规划运动学方程。在实际应用过程中,考虑到控制系统的计算复杂度,并不需要在机器人整个运行周期内均进行重复性路径规划,只需在机器人终止运行前的一段时间内开始进行重复性路径规划,便可以实现机器人无漂移重复运动。不失一般性,本文在总规划时间的后半段加入重复运动优化算子,故优化因子可表达为

$$\alpha_R(\theta) = \begin{cases} 0, & t < T/2 \\ \rho_R(\theta_{\text{init}} - \theta_{\text{now}}), & t > T/2 \end{cases} \quad (5)$$

为了使机器人终止时刻尽可能准确的回复到初始构型,优化因子进行调整:

$$\alpha_R(\theta) = \begin{cases} 0 & t < T/2 \\ \frac{\rho_R(\theta_{\text{init}} - \theta_{\text{now}})}{(T - t)} & t > T/2 \end{cases} \quad (6)$$

由式(6)可以看出,当机器人接近终止时刻时,优化项数值较大,在整个运动规划中作用效果明显,从而保证机器人最终时刻关节角度与初始关节角度偏差尽可能小。

考虑到在引入重复运动算子前后,机器人关节速度会产生突变,在式(6)中引入平滑因子 λ_R , 以保证重复运动算子不引起机器人关节角度及角速度突变,其具体表达式为

$$\lambda_R = \begin{cases} (t - t_{\text{sta}})^2 / T_{\text{smo}}^2, & t_{\text{sta}} < t < t_{\text{sta}} + T_{\text{smo}} \\ 1 & t_{\text{sta}} + T_{\text{smo}} < t < t_{\text{sto}} \\ (T_{\text{sum}} - t)^2 / T_{\text{smo}}^2, & t_{\text{sto}} < t < t_{\text{sta}} + T_{\text{sum}} \end{cases} \quad (7)$$

其中, t_{sta} 为开始重复运动优化的时间 ($t_{\text{sta}} > T/2$), T_{smo} 为过渡时间, T_{sum} 为开始重复运动优化的总时间, t_{sto} 为重复运动优化停止作用时间,给定 $T_{\text{sum}} \geq 2T_{\text{smo}}$ 。

将式(7)所示的平滑算子代入式(6),可以得到最终平滑重复运动算子为

$$\alpha_R(\theta) = \begin{cases} 0, & t < T/2 \\ \frac{\lambda_R \rho_R(\theta_{\text{init}} - \theta_{\text{now}})}{(T - t)}, & t > T/2 \end{cases} \quad (8)$$

上面给出了冗余度机器人末端执行封闭轨迹运动时,保证机器人最终能够回到初始构型的重复运动算子,并同时设计了平滑因子,将其融入重复运动算子中,解决了重复运动算子引入造成的关节速度

突变问题。

由于机器人受关节角度运行范围、连杆干涉以及环境等因素的影响,机器人关节存在极限位置。利用上述给出的重复运动规划算法进行机器人无漂移重复运动规划,应保证所有的关节角度不能超出给定的关节极限,否则机器人无法实现重复运动规划。在冗余度机器人进行重复运动规划的同时,利用其自运动特性可以回避关节极限。为此,以下针对冗余度机器人回避关节极限问题展开研究。

1.3 回避关节极限优化算子

常用的回避关节极限的方法有 Zghal 准则函数法^[12,13]及 Liegois 准则函数^[14]等。由于 Zghal 准则函数法求解简单,能够很好地反映关节接近关节限位的情况,故采用 Zghal 准则函数作为机器人回避关节限位的目标函数:

$$H_L(\theta) = \rho_L \sum_{i=1}^n \frac{(\theta_{imax} - \theta_{imin})^2}{(\theta_{imax} - \theta_i)(\theta_i - \theta_{imin})} \quad (9)$$

其中, θ_{imax} 为第 i 个关节上限值, θ_{imin} 为下限值, θ_i 为当前关节值, ρ_L 为权值系数,选择不同的 ρ_L 将影响优化算子在逆解中的权重。

由式(9)可以看出,当关节 i 角度值 θ_i 接近其关节极限时,对应 $H_L(\theta)$ 的值较大;当 θ_i 在其关节极限中心点附近时, $H_L(\theta)$ 的值较小。因此只需要控制函数 $H_L(\theta)$ 的值,使其尽可能小,便可以实现回避关节极限。为此,对式(9)进行求导,可以得出回避关节限位目标函数的梯度为

$$\alpha_L(\theta) = \rho_L \left\{ \frac{\partial H_L(\theta)}{\partial \theta_1}, \frac{\partial H_L(\theta)}{\partial \theta_2}, \dots, \frac{\partial H_L(\theta)}{\partial \theta_n} \right\} \quad (10)$$

其中, $\frac{\partial H_L(\theta)}{\partial \theta_i} = \frac{(\theta_{imax} - \theta_{imin})^2(2\theta_i - \theta_{imax} - \theta_{imin})}{(\theta_{imax} - \theta_i)^2(\theta_i - \theta_{imin})^2}$ 。

将式(10)代入到式(1)中便可以实现冗余度机器人回避关节极限运动规划。

在实际应用过程中,只需要在机器人关节接近其极限位置时,引入式(10)给出的回避关节极限算子即可实现回避关节极限的运动规划。避关节极限算子只需要在关节接近极限位置时引入运动方程中即可。为此,取避关节极限优化算子生效阈值为 θ_s , 当关节角大于 $\theta_{max} - \theta_s$ 或小于 $\theta_{min} + \theta_s$ 时, $\alpha_L(\theta)$ 按式(10)计算,否则 $\alpha_L(\theta)$ 为零。同理,为了避免引入避限位优化因子前后关节速度出现突变,引入平滑因子 λ_L , 由此可得平滑因子的回避关节极限优化算子为

$$\alpha_L(\theta) = \begin{cases} 0, & \theta_{min} + \theta_s < \theta < \theta_{max} - \theta_s \\ \rho_L \lambda_L \frac{\partial H_L(\theta)}{\partial \theta}, & \text{其他} \end{cases} \quad (11)$$

其中,

$$\lambda_L = \begin{cases} (t - t_{sta})^2 / T_{smo}^2, & t_{sta} < t < t_{sta} + T_{smo} \\ 1, & t_{sta} + T_{smo} < t < t_{sto} \\ (T_{sum} - t)^2 / T_{smo}^2, & t_{sto} < t < t_{sto} + T_{sum} \end{cases} \quad (12)$$

t 为当前时刻, t_{sta} 为开始回避限位时间, T_{smo} 为过度时间, T_{sum} 为回避算子启作用的总时间, t_{sto} 为回避优化停止作用时刻。为了避免出现机器人在开始回避关节极限的角度 $\theta_{max} - \theta_s$ 或 $\theta_{min} + \theta_s$ 处出现关节角振荡现象,设定 $T_{sum} \geq 2T_{smo}$ 。

1.4 总优化算子

为了将重复运动算子和回避关节极限算子同时引入到机器人运动学逆解中,本文采用任务优先级与任务分配理论^[11],通过调节式(2)中权重系数 γ 以实现不同性能指标优化分配。同时,考虑到各性能指标相互切换时,关节角速度连续性问题,采用如下时间平滑因子对性能指标权值系数进行处理:

$$\gamma_i = \begin{cases} (t - t_{sta}) / T_{smo}, & t_{sta} < t < t_{sta} + T_{smo} \\ 1, & t_{sta} + T_{smo} < t < t_{sto} \\ (t_{sum} - t) / T_{smo}, & t_{sto} < t < t_{sto} + T_{smo} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (13)$$

t 为当前时刻, t_{sta} 为引入优化算子时刻, T_{smo} 为平滑过渡时间, t_{sto} 为优化结束时刻。

根据式(2),同时引入重复运动算子及回避关节极限算子所得优化项为

$$\alpha_A = \gamma_R \cdot \alpha_R + \gamma_L \cdot \alpha_L \quad (14)$$

在实际应用中,考虑到关节超限直接会导致任务失败,因此优化项中回避关节极限算子的优先级应高于重复运动算子。时间大于总规划时间的一半后,除了回避关节极限生效的时间外,其余时间重复运动算子生效。即规划前 $0.5T$ 时间里,当关节角度值进入回避限位生效阈值为 θ_s 范围内时, $\alpha_A = \gamma_L \cdot \alpha_L$, γ_L 取式(13)结果。规划后 $0.5T$ 时间,若关节角度值未进入回避限位生效阈值为 θ_s 范围内,则 $\alpha_A = \gamma_R \cdot \alpha_R$, γ_R 取式(13);当关节角进入回避限位生效阈值,则 $\alpha_A = \gamma_R \cdot \alpha_R + \gamma_L \cdot \alpha_L$ 。

2 仿真验证

2.1 研究对象

本文以 8 自由度模块化机器人作为研究对象,图 1 为机器人零位构型及对应 DH 坐标系,表 1 为机器人 DH 的参数。文中除特殊说明的情况,关节角度单位均采用角度制表示,位置单位采用毫米(mm)表示,时间单位采用秒(s)表示。

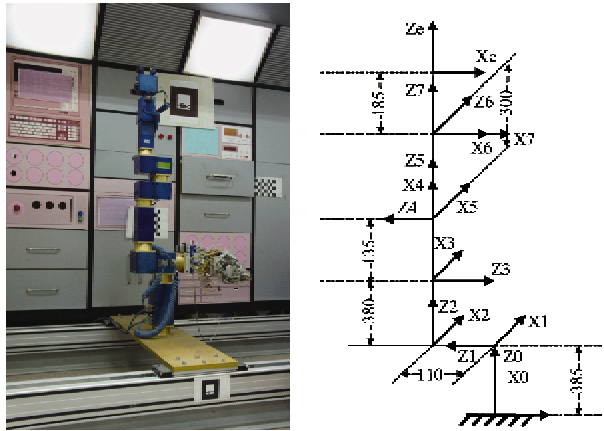


图 1 8 自由度模块化机器人及其 DH 坐标系

表 1 机器人 DH 参数

连杆	θ_i	d_i	a_{i-1}	α_{i-1}
1	$\theta_1(90)$	385	0	-90
2	$\theta_2(0)$	110	0	90
3	$\theta_3(0)$	380	0	90
4	$\theta_4(90)$	0	135	180
5	$\theta_5(90)$	0	0	90
6	$\theta_6(-90)$	300	0	-90
7	$\theta_7(0)$	0	0	90
8	$\theta_8(0)$	185	0	0

本文以机器人执行圆周封闭轨迹为例开展重复性运动规划及回避关节极限运动规划仿真验证。为了便于对比分析,该部分分别开展基于最小范数解、引入重复运动算子以及引入回避关节极限算子的冗余度机器人路径规划仿真实验。

在以下 3 个仿真实验中,机器人初始构型为 $\{-57^\circ, -45^\circ, 71^\circ, -45^\circ, 32^\circ, 80^\circ, 34^\circ, -28^\circ\}$, 对应的末端位姿为 $\{511, 424, 864, 1.56^\circ, 11.69^\circ, -88.14^\circ\}$ 。机器人末端圆周轨迹由机器人末端初始点、给定的中间点和终止点位姿来确定。设定机器人中间位姿为 $\{-300, 424, 1080, 1.56^\circ, 11.69^\circ,$

$-88.14^\circ\}$, 终止点位姿为 $\{0, 424, 850, 1.56^\circ, 11.69^\circ, -88.14^\circ\}$, 总规划时间为 250s。同时文中设定机器人所有关节角的上限值均为 140° , 下限值均为 -140° 。根据给定的 3 点即可确定机器人末端运动轨迹,进而在求解机器人沿预期轨迹运行的末端速度的基础上,以下分别给出最小范数解、引入重复运动算子以及引入回避关节极限算子的仿真实验结果。

2.2 最小范数逆解仿真实验

取式(1)中的优化项 $\alpha = 0$, 根据式(1)则可以得到利用最小范数逆解进行机器人路径规划的仿真结果。所得机器人关节角度及角速度变化曲线分别如图 2 和图 3 所示。

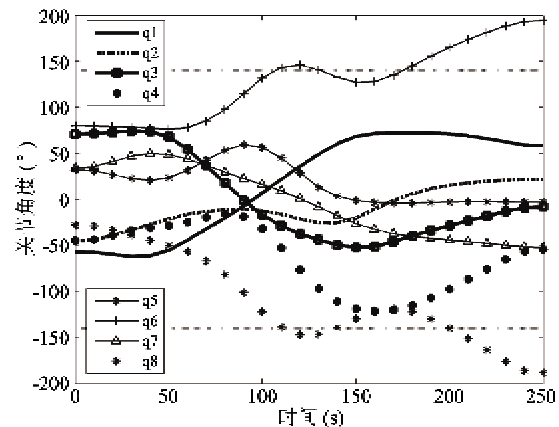


图 2 最小范数解所得关节角度曲线

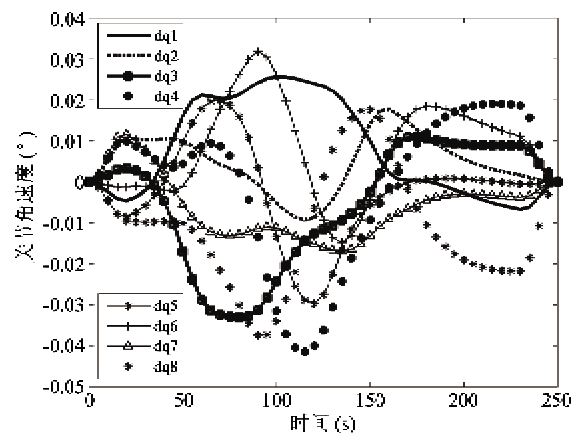


图 3 最小范数解所得关节角速度曲线

从仿真结果可得机器人终止时刻关节角为 $\{58.2^\circ, 21.8^\circ, -7.7^\circ, -54.5^\circ, -3.2^\circ, 194.3^\circ, -52.1^\circ, -188.6^\circ\}$ 。通过与初始关节角度对比可以发现,终止时刻机器人出现了关节漂移现象,漂移的关节角度偏差为 $\{115.2^\circ, 66.8^\circ, 78.8^\circ, 9.2^\circ, 35.2^\circ, 114.3^\circ, 86.1^\circ, 160.6^\circ\}$, 其中最大关节角度

偏差值为 160.6° 。由此可以看出,利用最小范数逆解进行封闭路径的轨迹规划,要使机器人终止时刻能够回到初始关节角度必须进行复位操作。此外,从仿真结果可以看出,在机器人运动过程中,关节 6 出现最大角度值为 194.3° ,关节 8 出现最小关节角度值为 -188.6° ,这两个关节的角度值均已超出了设定的机器人关节角度限位条件 $\pm 140^\circ$ 。

2.3 重复运动优化仿真实验

取式(1)中的优化项 α 为式(8)所示的 α_R ,其中 $\rho_R = 2.8, T_{\text{smo}} = 10\text{s}$,根据式(1)则可以得到引入重复运动优化算子进行机器人重复性运动规划的仿真结果。所得机器人关节角度及角速度变化曲线分别如图 4 和图 5 所示。

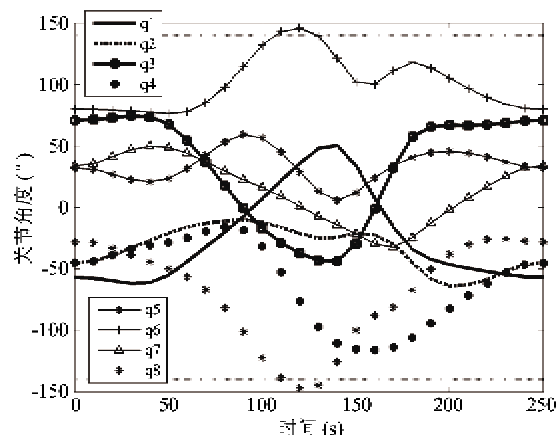


图 4 重复运动算子所得关节角度曲线

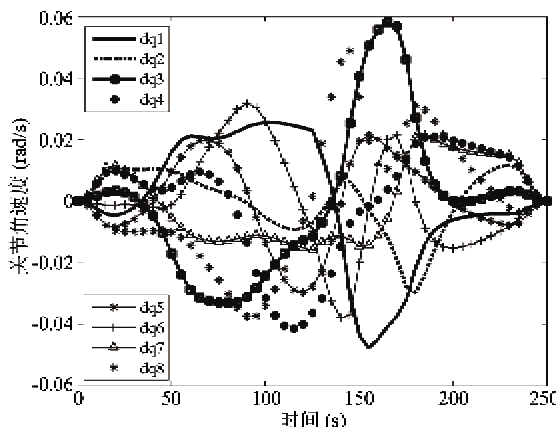


图 5 重复运动算子所得关节角速度曲线

由图 4 可看出,采用重复运动优化算子能够使得机器人最终关节角度回到初始关节角度。引入重复运动优化算子后得到的机器人最终关节角度为 $\{-56.96^\circ, -45.02^\circ, 70.96^\circ, -45.06^\circ, 32.05^\circ, 80.01^\circ, 33.95^\circ, -27.99^\circ\}$ 。通过与初始关节角度

对比,可得偏差为 $\{0.04^\circ, 0.02^\circ, 0.04^\circ, 0.06^\circ, 0.05^\circ, 0.01^\circ, 0.05^\circ, 0.01^\circ\}$,最大偏差值为 0.06° ,对于大多数机器人而言,该偏差小于机器人可识别的最小数值,表明所得结果满足实际应用需求。

同时为了验证提出算法的计算复杂度小的特点,与现有的原对偶神经网络算法进行了计算耗时比较。在主频为 3.3GHz 的双核处理器、内存 3.24GB 的计算机上,执行相同的圆周路径规划,进行十次路径规划计算,并求得原对偶神经网络算法与本文提出算法的计算平均耗时分别为 1.4s 和 0.12s 。由此可以看出,本文提出的重复性路径规划算法计算量更小,更适用于机器人实时控制。

2.4 回避关节极限优化规划仿真实验

取式(1)中的优化项 α 为式(10)所示的 α_L ,其中 $\rho_L = 0.025$,根据式(1)则可以得到引入回避关节极限算子进行机器人回避关节极限运动规划的仿真结果。所得机器人关节角度及角速度变化曲线分别如图 6 和图 7 所示。

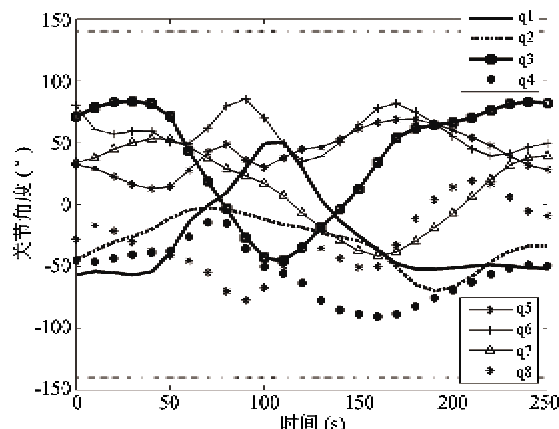


图 6 Zghal 避极限法关节角度曲线

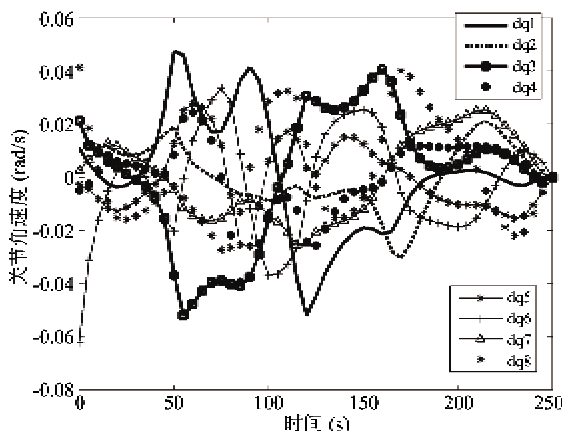


图 7 Zghal 避极限法关节角速度曲线

从图6可以看出,通过引入回避关节极限算子,机器人运动过程中各关节角均未超限,但是整个机器人关节轨迹波动剧烈。同时,结合图7可以发现机器人关节速度变化剧烈,且初始和终止时刻机器人关节角速度均不为零,将导致机器人初始和终止时刻关节力矩较大。

利用式(11)给出的改进后回避关节极限算子进行路径规划,取 $\rho_L = 0.04$, $T_{\text{smo}} = 40\text{s}$,可以得到机器人关节角度及角速度变化曲线分别如图8和图9所示。

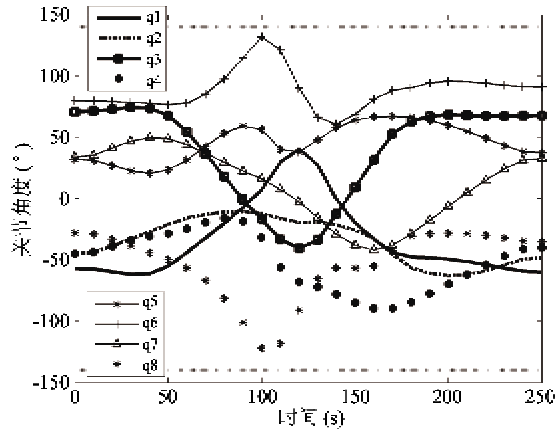


图8 改进避极限法关节角度曲线

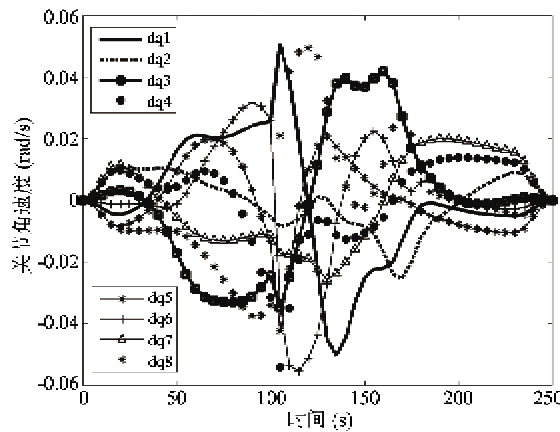


图9 改进避极限法关节角速度曲线

通过分别对比图6与图8、图7与图9可以发现,改进后回避关节极限算子在保证机器人回避关节限位的同时,使关节角度波动尽量减少,同时能够保证机器人初始关节速度与最终关节速度均为零,消除了初始与终止时刻关节力矩较大的问题。

2.5 考虑关节限位的重复性运动规划仿真实验

取式(1)中的优化项 α 为式(14)所示的 α_A ,其中 $\rho_R = 2.8$, $\rho_L = 0.0001$, $T_{\text{smo}} = 20\text{s}$,根据式(1)则

可以得到机器人考虑关节限位的重复性运动规划的仿真结果。整个运行过程中,机器人关节角度及角速度变化曲线分别如图10和图11所示。

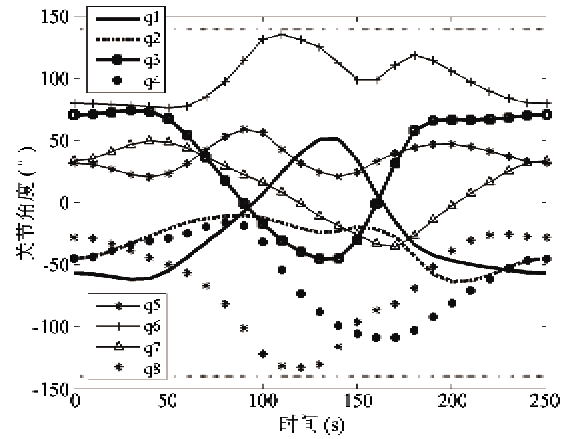


图10 同时优化所得关节角度曲线

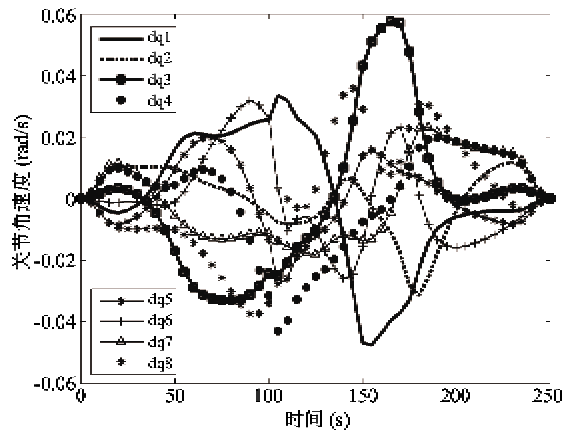


图11 同时优化所得关节角速度曲线

从图10和图11可以看出,机器人终止时刻关节角为 $\{-56.96^\circ, -45.03^\circ, 70.96^\circ, -45.07^\circ, 32.06^\circ, 80^\circ, 33.95^\circ, -27.99^\circ\}$ 。通过与初始关节角度对比可以发现,关节角最大偏差为 0.07° 。对于大多数机器人而言,该角度偏差小于机器人的关节精度,规划结果满足重复性要求。同时,整个圆周作业过程中,各关节角均未超限。

由此可以看出,利用本文提出的考虑关节限位的重复性运动规划的方法能够在实现机器人重复运动的同时保证各关节角均不超限,规划所得的数据具有实际应用价值。

3 实验验证

在完成数值仿真实验的基础上,为了验证本文

提出算法的实用性,利用实验室现有的 8 自由度模块化机器人针对本文提出的路径规划算法开展实验

验证。所有规划参数与实验初始条件均采用数值仿真实验中的数据,可以得到图 12 所示的实验结果。

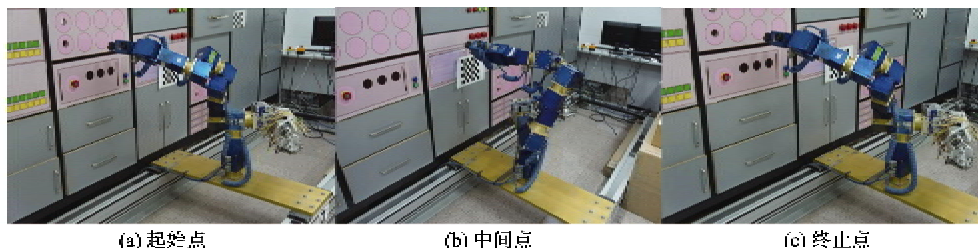


图 12 实验结果

实验过程中,每隔 1s 读取一次机器人当前时刻的关节角度值,对采集的关节角度数据进行差值可得到相应的关节角速度值,图 13 与图 14 分别为实验所得关节角度及角速度的变化曲线。

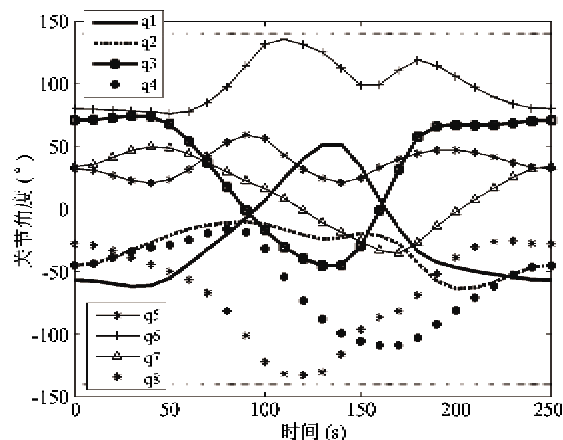


图 13 实验所得关节角度曲线

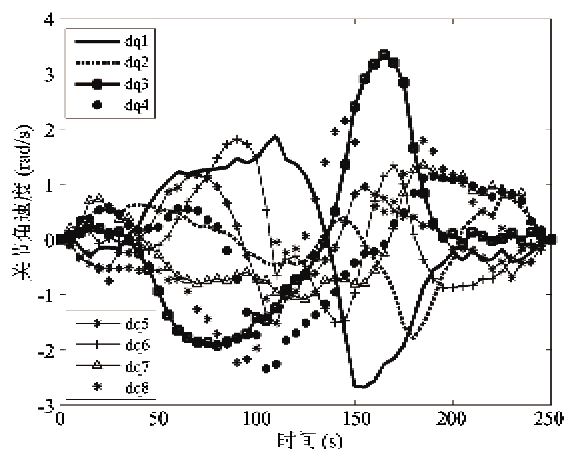


图 14 实验所得关节角速度曲线

通过传感器采集的机器人终止时刻关节角度为 $\{-56.86^\circ, -45.12^\circ, 70.87^\circ, -45.25^\circ, 32.24^\circ, 79.99^\circ, 33.81^\circ, -27.95^\circ\}$ 。比较图 10 与图 13 结

果可看出,实验所得结果与数值计算结果保持一致,只存在微小差别;比较图 12 与图 14 结果可以看出,实验所得关节角速度变化与数值计算结果基本一致,仅在规划启动和结束阶段存在一定的振动现象,振动产生的主要原因为机器人本身的动力学特性、编码器误差及采样误差等。从实验结果可以看出,利用本文提出的考虑关节限位的重复性运动规划算法能够在实现机器人重复性路径规划的同时保证各关节角度均不超限。

4 结 论

本文基于伪逆控制算法,提出了利用重复运动算子实现冗余机器人重复性运动规划的方法,该方法能够解决冗余机器人末端执行闭环路径时关节空间中关节轨迹不重复的问题。该算法与现有的重复性路径规划方法相比,计算速度快,实时性高。同时基于任务优先级理论在重复性路径规划过程中引入了回避关节极限算子,保证机器人运行过程中不超出关节限位。在回避关节极限算子中,通过引入平滑因子,改善关节速度平滑性,解决了关节角度波动的问题。通过数值仿真与实验验证了提出的考虑关节限位的机器人重复性路径规划方法的正确性和有效性。文中提出的路径规划算法能够应用于机器人的实际控制系统中。

参考文献

- [1] Klein C A, Huang C H. Review of pseudoinverse control for use with kinematically redundant manipulators. *IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics*, 1983, 13 (3):245-250
- [2] Klein C A, Kee K B. The nature of drift in pseudoinverse control of kinematically redundant manipulators. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1989, 5(2):

231-234

- [3] Shamir T, Yomdin Y. Repeatability of redundant manipulators; mathematical solution of the problem. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1988, 33(11):1004-1009
- [4] Chevillereau C, Khalil W. A new method for the solution of the inverse kinematics of redundant robots. In: 1988 IEEE International Conference on Robots and Automation, Philadelphia, USA, 1988. 37-42
- [5] Baillieul J. Kinematic programming alternatives for redundant manipulators. In: 1985 IEEE International Conference on Robots and Automation, St. Louis, USA, 1985. 722-728
- [6] 赵京,白师贤. 空间 7R 冗余度机器人关节运动重复性问题的研究. *机械设计*, 1999(2):25-27
- [7] Cai B H, Zhang Y N. Different-level redundancy-resolution and its equivalent relationship analysis for robot manipulators using gradient-descent and Zhang's neural-dynamic methods. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2012, 59(8):3146-3155
- [8] Zhang Y N, Lv X J, Li Z H. Repetitive motion planning of PA10 robot arm subject to joint physical limits and using LVI-based primal-dual neural network. *Mechatronics*, 2008, 18(9):475-485
- [9] 张雨浓,郭东生,蔡炳煌等. 基于新型性能指标的冗余度机械臂重复运动规划之方案分析与验证. *武汉理工大学学报*, 2011, 35(1):67-71
- [10] 能有伦,丁汉,刘恩沧. 机器人学. 北京:机械工业出版社, 2009:253-255
- [11] 陈伟海,杨宗煦,张启先等. 冗余度机器人多性能准则优化研究. *北京航空航天大学学报*, 1996, 22(4):484-489
- [12] Zghal H, Dubey R V, Euler J A. Efficient gradient projection optimization for manipulators with multiple degrees of redundancy. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robots and Automation, Cincinnati, USA, 1990. 1006-1011
- [13] Seong S P, Wan K C. Combined Method of Weighted Least Norm and Gradient Projection for Avoiding Joint Limit. In: Proceedings of the 8th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence, Incheon, Korea, 2011. 798-799
- [14] Liegeois A. Automatic supervisory control of the configuration and behavior of multibody mechanisms. *IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics*, 1977, 7(12):868-871

Research on repeatable path plan of redundant robots considering the joint limit

Jia Qingxuan, Wu Chufeng, Chen Gang, Sun Hanxu

(Automation School, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876)

Abstract

A repetitive motion plan method considering the joint limit was studied to solve the problem of joint angle drift of redundant robots whose end-effector is planned to trace a closed path in the Cartesian space. Firstly, a repetitive motion optimization operator based on the gradient projection was presented, which was introduced into the pseudo-inverse kinematics equation to achieve the drift-free repetitive motion of redundant robots. Secondly, an improved resolution for avoiding the joint limit was proposed by designing a continuous scale factor, which was integrated into the plan equation to realize the repetitive path plan considering the joint limit of redundant robots. Finally, the correctness and efficiency of the proposed solution were verified by the simulation results while the practicality of the solution was shown based on the experiment result of an eight-degree-freedom robot.

Key words: redundant robots, the gradient projection, repeatable motion operator, joint limit