



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 103235513 B

(45)授权公告日 2016.12.28

(21)申请号 201310145357.4

(22)申请日 2013.04.24

(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 103235513 A

(43)申请公布日 2013.08.07

(73)专利权人 武汉科技大学
地址 430081 湖北省武汉市青山区建设一路

(72)发明人 吴怀宇 韩涛 陈雪锋 吴若鸿
钟锐 张志芬 罗欢

(74)专利代理机构 武汉科皓知识产权代理事务
所(特殊普通合伙) 42222
代理人 张火春

(51)Int. Cl.
G05B 13/04(2006.01)

(56)对比文件

EP 1348521 A1,2003.10.01,

CN 101564840 A,2009.10.28,

张波涛等.多连杆冗余移动机械臂建模与运动规划.《科技通报》.2010,第26卷(第2期),第200-205,232页.

李庆中等.基于遗传算法的移动机器人动态避障路径规划方法.《模式识别与人工智能》.2002,第15卷(第2期),第161-166页.

王鑫等.基于遗传算法的装填机械臂轨迹多目标优化设计.《新技术新工艺》.2011,(第12期),第14-18页.

审查员 李彦琴

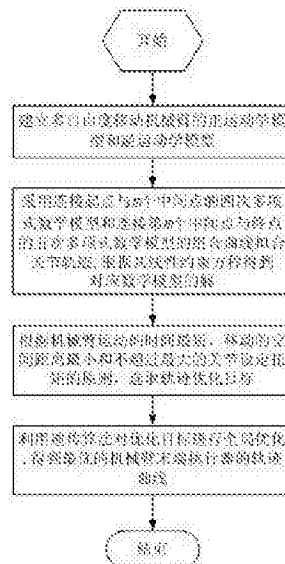
权利要求书5页 说明书13页 附图5页

(54)发明名称

一种基于遗传算法的移动机械臂轨迹规划优化方法

(57)摘要

本发明涉及一种基于遗传算法的移动机械臂轨迹规划优化方法。其技术方案是：先建立多自由度移动机械臂的正运动学模型和逆运动学模型；再采用四次多项式数学模型和五次多项式数学模型的组合曲线拟合关节轨迹，根据其线性约束方程得到对应数学模型的解；然后根据移动机械臂运动时间最短、移动的空间距离最小和不超过最大的关节设定扭矩的原则，选取轨迹优化目标；最后利用遗传算法对优化目标进行全局优化，得到最优的机械臂末端执行器的轨迹曲线。本发明不仅提高了机械臂轨迹规划的效率和跟踪精度，还解决了移动机械臂的实时轨迹规划的问题和不确定环境下机械臂轨迹规划优化和控制的问题，为移动机械臂轨迹规划优化提供了一种有效方法。



1.一种基于遗传算法的移动机械臂轨迹规划优化方法,其特征在于实现该方法的步骤是:

步骤一、建立多自由度移动机械臂的正运动学模型和逆运动学模型

多自由度移动机械臂正运动学模型包括末端执行器位置数学模型和末端执行器的方位 Φ_e 的数学模型,其中:

末端执行器位置数学模型为

$$x_e = L_1 \cos \theta_1 + L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) + L_3 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + \dots + L_i \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \dots + \theta_i) \quad (1)$$

$$y_e = L_1 \sin \theta_1 + L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) + L_3 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + \dots + L_i \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \dots + \theta_i) \quad (2)$$

末端执行器的方位 Φ_e 的数学模型为

$$\Phi_e = \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \dots + \theta_i \quad (3)$$

多自由度移动机械臂逆运动学模型的机械臂关节角度数学模型为

$$\begin{aligned} \theta_1 &= \alpha - \gamma \\ \theta_2 &= \pi - \beta \\ &\vdots \\ \theta_i &= \Phi_e - \theta_1 - \theta_2 - \dots - \theta_{i-1} \end{aligned} \quad (4)$$

式(1)、(2)、(3)和(4)中: i 表示移动机械臂的连杆个数, $i=1,2,3,4,5,6,7,8$,

L_i 表示移动机械臂各连杆的长度,

θ_i 表示当 $i=1$ 时移动机械臂连杆1与坐标系横轴 x 的夹角和当

$i=2\sim 8$ 时移动机械臂连杆 i 与连杆 $i-1$ 的夹角;

步骤二、采用连接起点与前 $m-1$ 个中间点的四次多项式数学模型和连接第 m 个中间点与终点的五次多项式数学模型的组合曲线拟合关节轨迹;根据四次多项式的线性约束方程和五次多项式的线性约束方程得到四次多项式数学模型的解和五次多项式数学模型的解;

步骤三、给定移动机械臂运动的起点位置 θ_0 、起点速度 $\dot{\theta}_0$ 、起点加速度 $\ddot{\theta}_0$ 、终点位置 θ_f 、终点速度 $\dot{\theta}_f$ 、终点加速度 $\ddot{\theta}_f$ 和总的运行时间 t_T ,根据移动机械臂运动的时间最短、移动的空间距离最小和不超过最大的关节设定扭矩的原则,选取轨迹优化的目标为 $[\theta_{m1}, \theta_{m2}, \dots, \theta_{mi}, \Phi_{me}, \dot{\theta}_{m1}, \dot{\theta}_{m2}, \dots, \dot{\theta}_{mi}, t_1, t_2]$;

步骤四、利用遗传算法对步骤三中所选取的移动机械臂轨迹规划优化的目标进行全局优化,得到最优的移动机械臂末端执行器的轨迹曲线,即得到移动机械臂轨迹规划优化的目标值;

选取群体大小至少为100,编码方式为实数编码, $P_c=0.5\sim 0.8$, $P_m=0.03\sim 0.05$,适应度函数为

$$F_f = \frac{1}{\beta_1 F_{ot} + \beta_2 F_q + \beta_3 F_c + \beta_4 t_T} \quad (5)$$

式(5)中: F_{ot} 表示关节力矩的罚函数,

F_q 表示每个关节运行的总距离,

F_c 表示空间的轨迹长度,

t_T 表示总的运行时间,

$\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ 表示与 F_{ot}, F_q, F_c, t_T 依次对应的权系数;

机械臂连杆长度分别为 L_1, L_2, \dots, L_i, i 个关节的最大力矩分别为 $\tau_{1max}, \tau_{2max}, \dots, \tau_{imax}$, 初始时刻的速度、加速度为零和终止时刻的速度、加速度为零, 优化目标

$[\theta_{m1}, \theta_{m2}, \dots, \theta_{mi}, \Phi_{me}, \dot{\theta}_{m1}, \dot{\theta}_{m2}, \dots, \dot{\theta}_{mi}, t_1, t_2]$ 约束范围为

$$\begin{aligned} -\pi &\leq \theta_i \leq \pi \quad rad \quad i=1, 2, \dots, 8 \\ -\pi &\leq \Phi_e \leq \pi \quad rad \\ -\pi/4 &\leq \dot{\theta}_i \leq \pi/4 \quad rad/sec \\ 1 &\leq t_1 \leq 8 \quad sec \\ 1 &\leq t_2 \leq 8 \quad sec \end{aligned} \quad (6)$$

式(6)中: θ_i 表示当 $i=1$ 时移动机械臂连杆1与坐标系横轴x的夹角和当 $i=2\sim 8$ 时移动机械臂连杆 i 与连杆 $i-1$ 的夹角,

Φ_e 表示移动机械臂末端执行器的方位,

$\dot{\theta}_i$ 表示移动机械臂关节 i 的速度,

t_1 表示起点到中间点的运行时间,

t_2 表示中间点到终点的运行时间。

2. 根据权利要求1所述的基于遗传算法的移动机械臂轨迹规划优化方法, 其特征在于所述的连接起点与 m 个中间点的四次多项式数学模型为

$$\theta_{k,k+1}(t) = a_{k0} + a_{k1}T_k + a_{k2}T_k^2 + a_{k3}T_k^3 + a_{k4}T_k^4, k=0, 1, \dots, m-1 \quad (7)$$

式(7)中: a_{k0}, \dots, a_{k4} 为待定参数,

T_k 表示从末端执行器轨迹点 k 到轨迹点 $k+1$ 的运行时间,

$\theta_{k,k+1}(t)$ 表示末端执行器在轨迹点 k 与轨迹点 $k+1$ 的夹角。

3. 根据权利要求1所述的基于遗传算法的移动机械臂轨迹规划优化方法, 其特征在于所述的连接第 m 个中间点与终点的五次多项式数学模型为

$$\theta_{k,k+1}(t) = b_{k0} + b_{k1}T_k + b_{k2}T_k^2 + b_{k3}T_k^3 + b_{k4}T_k^4 + b_{k5}T_k^5, k=m, \dots, f \quad (8)$$

式(8)中: b_{k0}, \dots, b_{k5} 为待定参数,

T_k 表示从末端执行器轨迹点 k 到轨迹点 $k+1$ 的运行时间,

m 表示第 m 个中间点,

f 表示终点,

m, \dots, f 表示介于第 m 个中间点与终点之间的点。

4. 根据权利要求1所述的基于遗传算法的移动机械臂轨迹规划优化方法, 其特征在于所述的四次多项式的线性约束方程为

$$\begin{aligned} \theta_k &= a_{k0} \\ \theta_{k+1} &= a_{k0} + a_{k1}T_k + a_{k2}T_k^2 + a_{k3}T_k^3 + a_{k4}T_k^4 \\ \dot{\theta}_k &= a_{k1} \\ \dot{\theta}_{k+1} &= a_{k1} + 2a_{k2}T_k + 3a_{k3}T_k^2 + 4a_{k4}T_k^3 \\ \ddot{\theta}_k &= 2a_{k2} \end{aligned} \quad (9)$$

式(9)中： a_{k0}, \dots, a_{k4} 为待定参数，
 k 表示末端执行器的轨迹点，
 T_k 表示从末端执行器轨迹点 k 到轨迹点 $k+1$ 的运行时间，
 θ_k 表示末端执行器在其轨迹点 k 时的关节角度，
 $\dot{\theta}_k$ 表示末端执行器在其轨迹点 k 时的关节速度，
 $\ddot{\theta}_k$ 表示末端执行器在其轨迹点 k 时的关节加速度。

5. 根据权利要求1所述的基于遗传算法的移动机械臂轨迹规划优化方法，其特征在于所述的五次多项式的线性约束方程为

$$\begin{aligned}
 \theta_k &= b_{k0} \\
 \theta_{k+1} &= b_{k0} + b_{k1}T_k + b_{k2}T_k^2 + b_{k3}T_k^3 + b_{k4}T_k^4 + b_{k5}T_k^5 \\
 \dot{\theta}_k &= b_{k1} \\
 \dot{\theta}_{k+1} &= b_{k1} + 2b_{k2}T_k + 3b_{k3}T_k^2 + 4b_{k4}T_k^3 + 5b_{k5}T_k^4 \\
 \ddot{\theta}_k &= 2b_{k2} \\
 \ddot{\theta}_{k+1} &= 2b_{k2} + 6b_{k3}T_k + 12b_{k4}T_k^2 + 20b_{k5}T_k^3
 \end{aligned} \tag{10}$$

式(10)中： b_{k0}, \dots, b_{k5} 为待定参数，
 k 表示末端执行器的轨迹点，
 T_k 表示从末端执行器轨迹点 k 到轨迹点 $k+1$ 的运行时间，
 θ_k 表示末端执行器在其轨迹点 k 时的关节角度，
 $\dot{\theta}_k$ 表示末端执行器在其轨迹点 k 时的关节速度，
 $\ddot{\theta}_k$ 表示末端执行器在其轨迹点 k 时的关节加速度。

6. 根据权利要求1所述的基于遗传算法的移动机械臂轨迹规划优化方法，其特征在于所述的四次多项式数学模型的解为

$$\begin{aligned}
 a_{k0} &= \theta_k \\
 a_{k1} &= \dot{\theta}_k \\
 a_{k2} &= \ddot{\theta}_k / 2 \\
 a_{k3} &= (-4\theta_k + 4\theta_{k+1} - 3\dot{\theta}_k T_k - \dot{\theta}_{k+1} T_k - \ddot{\theta}_k T_k^2) / T_k^3 \\
 a_{k4} &= (3\theta_k - 3\theta_{k+1} + 2\dot{\theta}_k T_k + \dot{\theta}_{k+1} T_k + \ddot{\theta}_k T_k^2 / 2) / T_k^4
 \end{aligned} \tag{11}$$

式(11)中： a_{k0}, \dots, a_{k4} 为待定参数，
 k 表示末端执行器的轨迹点，
 T_k 表示从末端执行器轨迹点 k 到轨迹点 $k+1$ 的运行时间，
 θ_k 表示末端执行器在其轨迹点 k 时的关节角度，
 $\dot{\theta}_k$ 表示末端执行器在其轨迹点 k 时的关节速度，
 $\ddot{\theta}_k$ 表示末端执行器在其轨迹点 k 时的关节加速度。

7. 根据权利要求1所述的基于遗传算法的移动机械臂轨迹规划优化方法，其特征在于所述的五次多项式数学模型的解为

$$\begin{aligned}
b_{k0} &= \theta_k \\
b_{k1} &= \dot{\theta}_k \\
b_{k2} &= \ddot{\theta}_k / 2 \\
b_{k3} &= (-20\theta_k + 20\theta_{k+1} - (12\dot{\theta}_k + 8\dot{\theta}_{k+1})T_k - (3\ddot{\theta}_k - \ddot{\theta}_{k+1})T_k^2) / 2T_k^3 \\
b_{k4} &= (30\theta_k - 30\theta_{k+1} + (16\dot{\theta}_k + 14\dot{\theta}_{k+1})T_k + (3\ddot{\theta}_k - 2\ddot{\theta}_{k+1})T_k^2) / 2T_k^4 \\
b_{k5} &= (-12\theta_k + 12\theta_{k+1} - (6\dot{\theta}_k + 6\dot{\theta}_{k+1})T_k - (\ddot{\theta}_k - \ddot{\theta}_{k+1})T_k^2) / 2T_k^5
\end{aligned} \tag{12}$$

式(12)中： b_{k0}, \dots, b_{k5} 为待定参数，

k 表示末端执行器的轨迹点，

T_k 表示从末端执行器轨迹点 k 到轨迹点 $k+1$ 的运行时间，

θ_k 表示末端执行器在其轨迹点 k 时的关节角度，

$\dot{\theta}_k$ 表示末端执行器在其轨迹点 k 时的关节速度，

$\ddot{\theta}_k$ 表示末端执行器在其轨迹点 k 时的关节加速度。

8. 根据权利要求1所述的基于遗传算法的移动机械臂轨迹规划优化方法，其特征在于所述的关节力矩的罚函数 F_{ot} 为

$$F_{ot} = \sum_{j=1}^b \sum_{i=1}^n F_i^j \tag{13}$$

式(13)中： n 表示移动机械臂的关节个数，

b 表示起点与终点之间的中间点数目，

i 表示移动机械臂的关节点，

j 表示中间点，

$$F_i^j = \begin{cases} 0 & \tau_i^j < \tau_{imax} \\ |\tau_i^j| - \tau_{imax} & \tau_i^j \geq \tau_{imax} \end{cases} \tag{14}$$

式(14)中： τ_i^j 表示关节 i 的扭矩，

τ_{imax} 表示关节 i 的最大扭矩。

9. 根据权利要求1所述的基于遗传算法的移动机械臂轨迹规划优化方法，其特征在于所述的每个关节运行的总距离 F_q 为

$$F_q = \sum_{i=1}^n \sum_{j=2}^b |q_{ij} - q_{i,j-1}| \tag{15}$$

式(15)中： n 表示移动机械臂的关节个数，

b 表示起点与终点之间的中间点数目，

i 表示移动机械臂的关节点，

j 表示中间点，

$q_{i,j-1}$ 表示第 $j-1$ 个中间点运行的距离，

q_{ij} 表示第 j 个中间点运行的距离。

10. 根据权利要求1所述的基于遗传算法的移动机械臂轨迹规划优化方法，其特征在于

所述的空间的轨迹长度 F_c 为

$$F_c = \sum_{j=2}^b d(p_j, p_{j-1}) \quad (16)$$

式(16)中: b 表示起点与终点之间中间点的数目,

j 表示中间点,

p_{j-1} 表示中间点 $j-1$ 的位置,

p_j 表示中间点 j 的位置,

$d(p_j, p_{j-1})$ 表示中间点 j 与 $j-1$ 之间的距离。

一种基于遗传算法的移动机械臂轨迹规划优化方法

技术领域

[0001] 本发明属于机器人轨迹规划技术领域。具体涉及一种基于遗传算法的移动机械臂轨迹规划优化方法。

技术背景

[0002] 在当今工业生产和日常生活中移动机械臂发挥着越来越重要的作用,也引起了国内外研究者的广泛关注。研究的热点主要集中在移动机械臂的运动规划与控制方面,其中轨迹规划是机械臂轨迹控制的基础,对机械臂的平稳性、运行效率、作业精确性和能量消耗具有重要意义。

[0003] 所谓的轨迹规划是指给定起始点(初始状态位姿)与期望的终点(末端执行器的期望位姿),同时根据一定的任务要求寻求一条连接起终点的次优或最优的有效路径,然后将路径转换成机械臂各个关节的空间坐标,确定机械臂在运动过程中各关节的位移、速度和加速度,形成轨迹。轨迹规划能够减少机械臂的磨损、节省大量的作业时间、提高系统的操作能力和提高工作效率,能使整个系统高效、稳定和长期的运行。

[0004] 目前针对机械臂轨迹规划的方法有很多,有传统领域的自由空间法、人工势场法、可视图法、栅格解耦法和拓扑法等;有几何法规划领域的双圆弧算法、测地线法、切线法和曲线等弧长规划法等。近十年间,随着人工智能研究不断取得进展,许多智能算法也被用到移动机械臂的轨迹规划中,包括模糊逻辑与增强学习算法、神经网络和蚁群算法等。基于GA的时间最优机械臂轨迹规划算法(居鹤华, 什荣. 基于GA的时间最优机械臂轨迹规划算法[J]. 控制工程, 2012, 19(3): 472-477), 该算法根据运动学约束, 以最优时间为目标, 针对关节型机器人在静态环境下的点到点的轨迹规划问题, 利用GA算法解算多项式插值的时间, 使得运行时间和运行平稳度上都有突出优点, 但是没有解决不确定环境下机械臂轨迹规划优化和控制的问题。基于PSO的空间机械臂轨迹规划技术研究(刘正雄, 黄攀峰, 闫杰. 基于PSO的空间机械臂轨迹规划技术研究[J]. 计算机仿真, 2010, 27(11): 172-175), 该算法提出了一种基于PSO(粒子群优化算法)的参数化5-3-5轨迹规划方法, 利用PSO的优化能力找到合适的参数组合, 进行关节空间轨迹规划, 但却没有解决移动机械臂实时轨迹规划的问题。

发明内容

[0005] 本发明的目的是提供一种基于遗传算法的移动机械臂轨迹规划优化方法。该方法不仅能提高机械臂轨迹规划的效率和跟踪精度, 且能解决移动机械臂的实时轨迹规划问题, 还能解决不确定环境下机械臂轨迹规划优化和控制问题, 为移动机械臂轨迹规划的优化提供了一种有效的方法。

[0006] 为实现上述目的, 本发明采用的技术方案是: 所述基于遗传算法的移动机械臂轨迹规划优化方法是:

[0007] 步骤一、建立多自由度移动机械臂的正运动学模型和逆运动学模型

[0008] 多自由度移动机械臂正运动学模型包括末端执行器位置数学模型和末端执行器

的方位 Φ_e 的数学模型,其中:

[0009] 末端执行器位置数学模型为

$$[0010] \quad x_e = L_1 \cos \theta_1 + L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) + L_3 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + \dots + L_i \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \dots + \theta_i) \quad (1)$$

$$[0012] \quad y_e = L_1 \sin \theta_1 + L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) + L_3 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + \dots + L_i \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \dots + \theta_i) \quad (2)$$

[0014] 末端执行器的方位 Φ_e 的数学模型为

$$[0015] \quad \Phi_e = \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \dots + \theta_i \quad (3)$$

[0016] 多自由度移动机械臂逆运动学模型的机械臂关节角度数学模型为

$$[0017] \quad \begin{aligned} \theta_1 &= \alpha - \gamma \\ \theta_2 &= \pi - \beta \\ &\vdots \\ \theta_i &= \Phi_e - \theta_1 - \theta_2 - \dots - \theta_{i-1} \end{aligned} \quad (4)$$

[0018] 式(1)、(2)、(3)和(4)中: $i=1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8$, i 表示移动机械臂的连杆个数;

[0019] L_i 表示移动机械臂各连杆的长度;

[0020] θ_i 表示当 $i=1$ 时移动机械臂连杆1与坐标系横轴 x 的夹角和当 $i=2\sim 8$ 时移动机械臂连杆 i 与连杆 $i-1$ 的夹角。

[0021] 步骤二、采用连接起点与 m 个中间点的四次多项式数学模型和连接第 m 个中间点与终点的五次多项式数学模型的组合曲线拟合关节轨迹;根据四次多项式的线性约束方程和五次多项式的线性约束方程得到四次多项式数学模型的解和五次多项式数学模型的解。

[0022] 步骤三、给定移动机械臂运动的起点位置 θ_0 、起点速度 $\dot{\theta}_0$ 、起点加速度 $\ddot{\theta}_0$ 、终点位置 θ_f 、终点速度 $\dot{\theta}_f$ 、终点加速度 $\ddot{\theta}_f$ 和总的运行时间 t_T ,根据移动机械臂运动的时间最短、移动的空间距离最小和不超过最大的关节设定扭矩的原则,选取轨迹优化的目标为 $[\theta_{m1}, \theta_{m2}, \dots, \theta_{mi}, \Phi_{me}, \dot{\theta}_{m1}, \dot{\theta}_{m2}, \dots, \dot{\theta}_{mi}, t_1, t_2]$ 。

[0023] 步骤四、利用遗传算法对步骤三中所选取的移动机械臂轨迹规划优化的目标进行全局优化,得到最优的移动机械臂末端执行器的轨迹曲线,即得到移动机械臂轨迹规划优化的目标值。

[0024] 选取群体大小至少为100,编码方式为实数编码, $P_c=0.5\sim 0.8$, $P_m=0.03\sim 0.05$,适应度函数为

$$[0025] \quad F_f = \frac{1}{\beta_1 F_{ot} + \beta_2 F_q + \beta_3 F_c + \beta_4 t_T} \quad (5)$$

[0026] 式(5)中: F_{ot} 表示关节力矩的罚函数;

[0027] F_q 表示每个关节运行的总距离;

[0028] F_c 表示空间的轨迹长度;

[0029] t_T 表示总的运行时间;

[0030] $\beta_i (i=1, 2, 3, 4)$ 表示与 F_{ot} 、 F_q 、 F_c 、 t_T 依次对应的权系数。

[0031] 机械臂连杆长度分别为 L_1, L_2, \dots, L_i ;权系数分别为 $[\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4]$; i 个关节的最大

力矩分别为 $\tau_{1\max}, \tau_{2\max}, \dots, \tau_{i\max}$; 初始时刻的速度、加速度为零和终止时刻的速度、加速度为零, 优化目标 $[\theta_{m1}, \theta_{m2}, \dots, \theta_{mi}, \Phi_e, \dot{\theta}_{m1}, \dot{\theta}_{m2}, \dots, \dot{\theta}_{mi}, t_1, t_2]$ 约束范围为

[0032] $-\pi \leq \theta_i \leq \pi \text{ rad} (i=1, 2, \dots, 8)$

[0033] $-\pi \leq \Phi_e \leq \pi \text{ rad}$

[0034] $-\pi/4 \leq \dot{\theta}_i \leq \pi/4 \text{ rad/sec} (i=1, 2, \dots, 8)$ (6)

[0035] $1 \leq t_1 \leq 8 \text{ sec}$

[0036] $1 \leq t_2 \leq 8 \text{ sec}$

[0037] 式(6)中: θ_i 表示当 $i=1$ 时移动机械臂连杆1与坐标系横轴x的夹角和当

[0038] $i=2 \sim 8$ 时移动机械臂连杆 i 与连杆 $i-1$ 的夹角;

[0039] Φ_e 表示移动机械臂末端执行器的方位;

[0040] $\dot{\theta}_i$ 表示移动机械臂关节 i 的速度;

[0041] t_1 表示起点到中间点的运行时间;

[0042] t_2 表示中间点到终点的运行时间。

[0043] 所述的连接起点与 m 个中间点的四次多项式数学模型为

[0044] $\theta_{k,k+1}(t) = a_{k0} + a_{k1}T_k + a_{k2}T_k^2 + a_{k3}T_k^3 + a_{k4}T_k^4, (k=0, 1, \dots, m-1)$ (7)

[0045] 式(7)中: a_{k0}, \dots, a_{k4} 为待定参数;

[0046] T_k 表示从末端执行器轨迹点 k 到轨迹点 $k+1$ 的运行时间。

[0047] 所述的连接第 m 个中间点与终点的五次多项式数学模型为

[0048] $\theta_{k,k+1}(t) = b_{k0} + b_{k1}T_k + b_{k2}T_k^2 + b_{k3}T_k^3 + b_{k4}T_k^4 + b_{k5}T_k^5, (k=m, \dots, f)$ (8)

[0049] 式(8)中: b_{k0}, \dots, b_{k5} 为待定参数;

[0050] T_k 表示从末端执行器轨迹点 k 到轨迹点 $k+1$ 的运行时间;

[0051] θ_k 表示末端执行器在其轨迹点 k 时的关节角度;

[0052] $\dot{\theta}_k$ 表示末端执行器在其轨迹点 k 时的关节速度。

[0053] 所述的四次多项式的线性约束方程为

[0054] $\theta_k = a_{k0}$

[0055] $\theta_{k+1} = a_{k0} + a_{k1}T_k + a_{k2}T_k^2 + a_{k3}T_k^3 + a_{k4}T_k^4$

[0056] $\dot{\theta}_k = a_{k1}$ (9)

[0057] $\dot{\theta}_{k+1} = a_{k1} + 2a_{k2}T_k + 3a_{k3}T_k^2 + 4a_{k4}T_k^3$

[0058] $\ddot{\theta}_k = 2a_{k2}$

[0059] 式(9)中: a_{k0}, \dots, a_{k4} 为待定参数;

[0060] T_k 表示从末端执行器轨迹点 k 到轨迹点 $k+1$ 的运行时间;

[0061] θ_k 表示末端执行器在其轨迹点 k 时的关节角度;

[0062] $\dot{\theta}_k$ 表示末端执行器在其轨迹点 k 时的关节速度;

[0063] $\ddot{\theta}_k$ 表示末端执行器在其轨迹点 k 时的关节加速度。

[0064] 所述的五次多项式的线性约束方程为

[0065] $\theta_k = b_{k0}$

[0066] $\dot{\theta}_{k+1} = b_{k0} + b_{k1}T_k + b_{k2}T_k^2 + b_{k3}T_k^3 + b_{k4}T_k^4 + b_{k5}T_k^5$

[0067] $\ddot{\theta}_k = b_{k1}$

[0068] (10)

[0069] $\ddot{\theta}_{k+1} = b_{k1} + 2b_{k2}T_k + 3b_{k3}T_k^2 + 4b_{k4}T_k^3 + 5b_{k5}T_k^4$

[0070] $\dddot{\theta}_k = 2b_{k2}$

[0071] $\dddot{\theta}_{k+1} = 2b_{k2} + 6b_{k3}T_k + 12b_{k4}T_k^2 + 20b_{k5}T_k^3$

[0072] 式(10)中： b_{k0}, \dots, b_{k5} 为待定参数；

[0073] T_k 表示从末端执行器轨迹点k到轨迹点k+1的运行时间；

[0074] θ_k 表示末端执行器在其轨迹点k时的关节角度；

[0075] $\dot{\theta}_k$ 表示末端执行器在其轨迹点k时的关节速度；

[0076] $\ddot{\theta}_k$ 表示末端执行器在其轨迹点k时的关节加速度。

[0077] 所述的四次多项式数学模型的解为

[0078] $a_{k0} = \theta_k$

[0079] $a_{k1} = \dot{\theta}_k$

[0080] $a_{k2} = \ddot{\theta}_k / 2$ (11)

[0081] $a_{k3} = (-4\dot{\theta}_k + 4\dot{\theta}_{k+1} - 3\ddot{\theta}_k T_k - \ddot{\theta}_{k+1} T_k - \ddot{\theta}_k T_k^2) / T_k^3$

[0082] $a_{k4} = (3\ddot{\theta}_k - 3\ddot{\theta}_{k+1} + 2\dot{\theta}_k T_k + \dot{\theta}_{k+1} T_k + \dot{\theta}_k T_k^2 / 2) / T_k^4$

[0083] 式(11)中： a_{k0}, \dots, a_{k4} 为待定参数；

[0084] T_k 表示从末端执行器轨迹点k到轨迹点k+1的运行时间；

[0085] θ_k 表示末端执行器在其轨迹点k时的关节角度；

[0086] $\dot{\theta}_k$ 表示末端执行器在其轨迹点k时的关节速度；

[0087] $\ddot{\theta}_k$ 表示末端执行器在其轨迹点k时的关节加速度。

[0088] 所述的五次多项式数学模型的解为

[0089] $b_{k0} = \theta_k$

[0090] $b_{k1} = \dot{\theta}_k$

[0091] $b_{k2} = \ddot{\theta}_k / 2$

[0092] (12)

[0093] $b_{k3} = (-20\dot{\theta}_k + 20\dot{\theta}_{k+1} - (12\ddot{\theta}_k + 8\ddot{\theta}_{k+1})T_k - (3\ddot{\theta}_k - \ddot{\theta}_{k+1})T_k^2) / 2T_k^3$

[0094] $b_{k4} = (30\ddot{\theta}_k - 30\ddot{\theta}_{k+1} + (16\dot{\theta}_k + 14\dot{\theta}_{k+1})T_k + (3\dot{\theta}_k - 2\dot{\theta}_{k+1})T_k^2) / 2T_k^4$

[0095] $b_{k5} = (-12\ddot{\theta}_k + 12\ddot{\theta}_{k+1} - (6\dot{\theta}_k + 6\dot{\theta}_{k+1})T_k - (\dot{\theta}_k - \dot{\theta}_{k+1})T_k^2) / 2T_k^5$

[0096] 式(12)中： b_{k0}, \dots, b_{k5} 为待定参数；

[0097] T_k 表示从末端执行器轨迹点k到轨迹点k+1的运行时间;

[0098] θ_k 表示末端执行器在其轨迹点k时的关节角度;

[0099] $\dot{\theta}_k$ 表示末端执行器在其轨迹点k时的关节速度;

[0100] $\ddot{\theta}_k$ 表示末端执行器在其轨迹点k时的关节加速度。

[0101] 所述的关节力矩的罚函数 F_{ot} 为

$$[0102] \quad F_{ot} = \sum_{j=1}^b \sum_{i=1}^n F_i^j \quad (13)$$

[0103] 式(13)中:n表示移动机械臂的自由度;

[0104] b表示起点与终点之间节点的数目;

$$[0105] \quad F_i^j = \begin{cases} 0 & \tau_i^j < \tau_{imax} \\ \left| \tau_i^j \right| - \tau_{imax} & \tau_i^j \geq \tau_{imax} \end{cases} \quad (14)$$

[0106] 式(14)中: τ_i^j 表示关节i的扭矩;

[0107] τ_{imax} 表示关节i的最大扭矩。

[0108] 所述的每个关节运行的总距离 F_q 为

$$[0109] \quad F_q = \sum_{i=1}^n \sum_{j=2}^b |q_{ij} - q_{ij-1}| \quad (15)$$

[0110] 式(15)中:n表示移动机械臂的自由度;

[0111] b表示起点与终点之间节点的数目;

[0112] q_{ij-1} 表示第j-1个节点运行的距离;

[0113] q_{ij} 表示第j个节点运行的距离。

[0114] 所述的空间的轨迹长度 F_c 为

$$[0115] \quad F_c = \sum_{j=2}^b d(p_j, p_{j-1}) \quad (16)$$

[0116] 式(16)中: $d(p_j, p_{j-1})$ 表示节点 p_j 与 p_{j-1} 之间的距离。

[0117] 由于采用上述技术方案,本发明和现有技术相比具有如下经济效果:

[0118] 本发明以移动机械臂的运动时间最优,关节轨迹曲线的位移、速度、加速度的运动连续性作为优化目标以优化运动轨迹,采用遗传算法对关节运动距离、关节角度、关节速度、关节加速度、关节力矩、轨迹长度、轨迹曲线等各项特性指标进行权衡与优化,提高了轨迹跟踪的有效性和准确性,实现了移动机械臂轨迹的优化。结果表明所规划轨迹的关节位移、速度、加速度曲线是连续的,且机械臂运行的时间最短、移动的空间距离最小、轨迹长度最短和不超过最大的关节设定扭矩,为提高跟踪精度、达到更高的运行速度和降低机械的磨损提供了理想的轨迹。本发明节省了大量的作业时间、提高了系统的操作能力和工作效率,能使整个系统高效、稳定和长期的运行。

[0119] 本发明适用于移动机械臂轨迹规划的优化,能够生成平滑的曲线,容易跟踪轨迹,同时优化后的轨迹满足了相应的约束条件,且位移、速度和加速度曲线光滑连续。

[0120] 因此,本发明过程简单,容易实现,不仅提高了机械臂轨迹规划的效率和跟踪精度,且降低了机械的磨损,提供了理想的运动轨迹,还解决了移动机械臂的实时轨迹规划问题和不确定环境下移动机械臂轨迹规划优化和控制问题,为移动机械臂轨迹规划的优化提供了一种有效的方法。

附图说明

- [0121] 图1是本发明的流程示意图;
 [0122] 图2是本发明的一种三自由度移动机械臂示意图;
 [0123] 图3是图2的逆运动学求解示意图;
 [0124] 图4是图2的末端执行器的轨迹曲线示意图;
 [0125] 图5是图2的运动时间随遗传代数变化曲线示意图;
 [0126] 图6是图2总的关节运动距离随遗传代数变化曲线示意图;
 [0127] 图7是图2的轨迹长度随遗传代数变化曲线示意图;
 [0128] 图8是图2的关节角度随时间变化曲线示意图;
 [0129] 图9是图2的关节速度随时间变化曲线示意图;
 [0130] 图10是图2的关节加速度随时间变化曲线示意图;
 [0131] 图11是图2的关节力矩随时间变化曲线示意图。

具体实施方式

[0132] 下面结合附图和具体实施方式对本发明作进一步的描述,并非对其保护范围的限制。

[0133] 实施例1

[0134] 一种基于遗传算法的移动机械臂轨迹规划优化方法。本实施例如图2所示为三自由度移动机械臂,该移动机械臂由一个固定连杆和三个在平面内运动的活动连杆组成。所有的连杆均采用旋转副连接,关节轴垂直于连杆平面。

[0135] 由于移动机械臂是通过移动末端执行器E点来执行任务的,为了描述位置,引入坐标系xoy,其中x轴与底座连杆平行,坐标原点与第一个关节重合,末端执行器的位置用坐标 (x_e, y_e) 表示。为方便叙述,规定连杆的长度即相邻关节轴的间距,分别表示为 L_1 、 L_2 和 L_3 ,设点O、点A和点B分别位于三个关节轴上,点E在末端执行器上。设固定在底座连杆(连杆0)上的连杆1由执行器1驱动,连杆1与坐标系横轴x形成 θ_1 ,执行器2驱动固定在连杆1上的连杆2,连杆2相对于连杆1的夹角为 θ_2 ,执行器3驱动固定在连杆2上的连杆3,连杆3相对于连杆2的夹角为 θ_3 。

[0136] 本实施例的移动机械臂轨迹规划优化方法如图1所示,其具体步骤是:

[0137] 步骤一、建立三自由度移动机械臂的正运动学模型和逆运动学模型

[0138] 三自由度移动机械臂正运动学模型包括末端执行器位置数学模型和末端执行器的方位 Φ_e 的数学模型,其中:

[0139] 末端执行器位置数学模型为

$$[0140] \quad x_e = L_1 \cos \theta_1 + L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) + L_3 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \quad (1)$$

$$[0141] \quad y_e = L_1 \sin \theta_1 + L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) + L_3 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \quad (2)$$

[0171] T_k 表示从末端执行器轨迹点k到轨迹点k+1的运行时间；

[0172] θ_k 表示末端执行器在其轨迹点k时的关节角度；

[0173] $\dot{\theta}_k$ 表示末端执行器在其轨迹点k时的关节速度；

[0174] $\ddot{\theta}_k$ 表示末端执行器在其轨迹点k时的关节加速度。

[0175] 五次多项式的线性约束方程为

$$[0176] \quad \theta_k = b_{k0}$$

$$[0177] \quad \dot{\theta}_{k+1} = b_{k0} + b_{k1}T_k + b_{k2}T_k^2 + b_{k3}T_k^3 + b_{k4}T_k^4 + b_{k5}T_k^5$$

$$[0178] \quad \ddot{\theta}_k = b_{k1}$$

$$[0179] \quad \ddot{\theta}_{k+1} = b_{k1} + 2b_{k2}T_k + 3b_{k3}T_k^2 + 4b_{k4}T_k^3 + 5b_{k5}T_k^4 \quad (9)$$

$$[0180] \quad \ddot{\theta}_k = 2b_{k2}$$

$$[0181] \quad \ddot{\theta}_{k+1} = 2b_{k2} + 6b_{k3}T_k + 12b_{k4}T_k^2 + 20b_{k5}T_k^3$$

$$[0182] \quad \ddot{\theta}_k = 2b_{k2} + 6b_{k3}T_k + 12b_{k4}T_k^2 + 20b_{k5}T_k^3$$

[0183] 式(9)中： b_{k0}, \dots, b_{k5} 为待定参数；

[0184] T_k 表示从末端执行器轨迹点k到轨迹点k+1的运行时间；

[0185] θ_k 表示末端执行器在其轨迹点k时的关节角度；

[0186] $\dot{\theta}_k$ 表示末端执行器在其轨迹点k时的关节速度；

[0187] $\ddot{\theta}_k$ 表示末端执行器在其轨迹点k时的关节加速度。

[0188] 四次多项式数学模型的解为

$$[0189] \quad a_{k0} = \theta_k$$

$$[0190] \quad a_{k1} = \dot{\theta}_k$$

$$[0191] \quad a_{k2} = \ddot{\theta}_k / 2 \quad (10)$$

$$[0192] \quad a_{k3} = (-4\dot{\theta}_k + 4\dot{\theta}_{k+1} - 3\ddot{\theta}_k T_k - \ddot{\theta}_{k+1} T_k - \ddot{\theta}_k T_k^2) / T_k^3$$

$$[0193] \quad a_{k4} = (3\ddot{\theta}_k - 3\ddot{\theta}_{k+1} + 2\dot{\theta}_k T_k + \dot{\theta}_{k+1} T_k + \ddot{\theta}_k T_k^2 / 2) / T_k^4 \quad (10)$$

[0194] 式(10)中： a_{k0}, \dots, a_{k4} 为待定参数；

[0195] T_k 表示从末端执行器轨迹点k到轨迹点k+1的运行时间；

[0196] θ_k 表示末端执行器在其轨迹点k时的关节角度；

[0197] $\dot{\theta}_k$ 表示末端执行器在其轨迹点k时的关节速度；

[0198] $\ddot{\theta}_k$ 表示末端执行器在其轨迹点k时的关节加速度。

[0199] 五次多项式数学模型的解为

$$[0200] \quad b_{k0} = \theta_k$$

$$[0201] \quad b_{k1} = \dot{\theta}_k$$

$$[0202] \quad b_{k2} = \ddot{\theta}_k / 2$$

$$[0203] \quad b_{k3} = (-4\dot{\theta}_k + 4\dot{\theta}_{k+1} - 3\ddot{\theta}_k T_k - \ddot{\theta}_{k+1} T_k - \ddot{\theta}_k T_k^2) / T_k^3 \quad (11)$$

$$[0204] \quad b_{k3} = (-20\theta_k + 20\theta_{k+1} - (12\dot{\theta}_k + 8\dot{\theta}_{k+1})T_k - (3\ddot{\theta}_k - \ddot{\theta}_{k+1})T_k^2) / 2T_k^3$$

$$[0205] \quad b_{k4} = (30\theta_k - 30\theta_{k+1} + (16\dot{\theta}_k + 14\dot{\theta}_{k+1})T_k + (3\ddot{\theta}_k - 2\ddot{\theta}_{k+1})T_k^2) / 2T_k^4$$

$$[0206] \quad b_{k5} = (-12\theta_k + 12\theta_{k+1} - (6\dot{\theta}_k + 6\dot{\theta}_{k+1})T_k - (\ddot{\theta}_k - \ddot{\theta}_{k+1})T_k^2) / 2T_k^5$$

[0207] 式(11)中： b_{k0}, \dots, b_{k5} 为待定参数；

[0208] T_k 表示从末端执行器轨迹点k到轨迹点k+1的运行时间；

[0209] θ_k 表示末端执行器在其轨迹点k时的关节角度；

[0210] $\dot{\theta}_k$ 表示末端执行器在其轨迹点k时的关节速度；

[0211] $\ddot{\theta}_k$ 表示末端执行器在其轨迹点k时的关节加速度。

[0212] 本实施例中，由于 $n=3, m=1$ ；由式(10)、(11)可知，一共有11个待定参数；若轨迹曲线采用两段五次多项式曲线组成，则待定参数的个数将增加，计算量将增大，故本实施例采用四次多项式与五次多项式的组合轨迹曲线。

[0213] 步骤三、给定移动机械臂运动的起点位置 θ_0 、起点速度 $\dot{\theta}_0$ 、起点加速度 $\ddot{\theta}_0$ 、终点位置 θ_f 、终点速度 $\dot{\theta}_f$ 、终点加速度 $\ddot{\theta}_f$ 和总的运行时间 t_T ，根据移动机械臂运动的时间最短、移动的空间距离最小和不超过最大的关节设定扭矩的原则，选取轨迹优化的目标为 $[\theta_{m1}, \theta_{m2}, \theta_{m3}, \Phi_{me}, \dot{\theta}_{m1}, \dot{\theta}_{m2}, \dot{\theta}_{m3}, t_1, t_2]$ 。

[0214] 步骤四、利用遗传算法对步骤三中所选取的移动机械臂轨迹规划优化的目标进行全局优化，得到最优的移动机械臂末端执行器的轨迹曲线，即得到移动机械臂轨迹规划优化的目标值。

[0215] 选取群体大小为200，编码方式为实数编码， $P_c=0.8, P_m=0.05$ ，适应度函数为

$$[0216] \quad F_f = \frac{1}{\beta_1 F_{ot} + \beta_2 F_q + \beta_3 F_c + \beta_4 t_T} \quad (12)$$

[0217] 式(12)中： F_{ot} 表示关节力矩的罚函数；

[0218] F_q 表示每个关节运行的总距离；

[0219] F_c 表示空间的轨迹长度；

[0220] t_T 表示总的运行时间；

[0221] $\beta_i (i=1, 2, 3, 4)$ 表示与 F_{ot}, F_q, F_c, t_T 依次对应的权系数。

[0222] 关节力矩的罚函数 F_{ot} 为

$$[0223] \quad F_{ot} = \sum_{j=1}^b \sum_{i=1}^n F_i^j \quad (13)$$

[0224] 式(13)中： n 表示移动机械臂的自由度；

[0225] b 表示起点与终点之间节点的数目。

$$[0226] \quad F_i^j = \begin{cases} 0 & \tau_i^j < \tau_{i\max} \\ |\tau_i^j| - \tau_{i\max} & \tau_i^j \geq \tau_{i\max} \end{cases} \quad (14)$$

[0227] 式(14)中： τ_i 表示关节i的扭矩；

[0228] $\tau_{i\max}$ 表示关节i的最大扭矩。

[0229] 每个关节运行的总距离 F_q 为

$$[0230] \quad F_q = \sum_{i=1}^n \sum_{j=2}^b |q_{ij} - q_{i,j-1}| \quad (15)$$

[0231] 式(15)中： n 表示移动机械臂的自由度；

[0232] b 表示起点与终点之间节点的数目；

[0233] $q_{i,j-1}$ 表示第 $j-1$ 个节点运行的距离；

[0234] $q_{i,j}$ 表示第 j 个节点运行的距离。

[0235] 空间的轨迹长度 F_c 为

$$[0236] \quad F_c = \sum_{j=2}^b d(p_j, p_{j-1}) \quad (16)$$

[0237] 式(16)中： $d(p_j, p_{j-1})$ 表示节点 p_j 与 p_{j-1} 之间的距离。

[0238] 本实施例的移动机械臂的技术参数：机械臂连杆长度分别为 $L_1=1$ 、 $L_2=1$ 和 $L_3=0.5$ ，权系数分别为 $[\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4]=[2, 2, 2, 1]$ ；三个关节的最大力矩分别为 $\tau_{1\max}=45\text{Nm}$ 、 $\tau_{2\max}=20\text{Nm}$ 和 $\tau_{3\max}=5\text{Nm}$ ，初始时刻的速度、加速度为零和终止时刻的速度、加速度为零，优化目标 $[\theta_{m1}, \theta_{m2}, \theta_{m3}, \Phi_{me}, \theta_{m1}, \theta_{m2}, \theta_{m3}, t_1, t_2]$ 约束范围为

$$[0239] \quad -\pi \leq \theta_i \leq \pi \quad \text{rad} (i=1, 2, 3)$$

$$[0240] \quad -\pi \leq \Phi_e \leq \pi \quad \text{rad}$$

$$[0241] \quad -\pi/4 \leq \dot{\theta}_i \leq \pi/4 \quad \text{rad/sec} (i=1, 2, 3) \quad (17)$$

$$[0242] \quad 1 \leq t_1 \leq 8 \quad \text{sec}$$

$$[0243] \quad 1 \leq t_2 \leq 8 \quad \text{sec}$$

[0244] 式(17)中： θ_i 表示当 $i=1$ 时移动机械臂连杆1与坐标系横轴 x 的夹角和

[0245] 当 $i=2\sim 3$ 时移动机械臂连杆 i 与连杆 $i-1$ 的夹角；

[0246] Φ_e 表示移动机械臂末端执行器的方位；

[0247] $\dot{\theta}_i$ 表示移动机械臂关节 i 的速度；

[0248] t_1 表示起点到中间点的运行时间；

[0249] t_2 表示中间点到终点的运行时间。

[0250] 本实施例中，移动机械臂起始点位姿为 $(x=0.5, y=2, \Phi_e=100^\circ)$ ，终点坐标为 $(-2, 0.5)$ 。移动机械臂末端执行器的轨迹曲线如图4所示，移动机械臂末端执行器的运动时间 t_T 、关节运动距离 f_q 、轨迹长度 f_c 随遗传代数变化曲线依次如图5、6、7所示，移动机械臂末端执行器的关节角度、速度、加速度及关节力矩随时间变化曲线依次如图8、9、10、11所示，空心圆圈表示优化的中间节点。

[0251] 在本实施例中，基于遗传算法的移动机械臂轨迹优化的目标 $[\theta_{m1}, \theta_{m2}, \theta_{m3}, \Phi_{me}, \theta_{m1}, \theta_{m2}, \theta_{m3}, t_1, t_2]$ 依次为： $0.9671, 1.3060, -0.0883, 3.1414, 0.7820, 0.0520, 0.0022, 1.1629, 1.7002$ ，移动机械臂末端执行器的轨迹长度 $f_c=3.2015$ ，总的关节

运动距离 $f_q=1.9063$,总的超调力矩 $f_{ot}=0$,总的运行时间 $t_T=2.8631$ 。

[0252] 考虑到起始点坐标(0.5, 2),终点坐标(-2, 0.5),则连接起点与终点的所有轨迹中两点之间的直线段轨迹最短,其轨迹长度为 $l=2.9155$,而本实施例优化后得到的轨迹长度 $f_c=3.2015$,这是因为本实施例综合考虑优化轨迹长度、总的关节运动距离和总的运行时间的结果。如图5~7所示,适应度函数中的运动时间 t_T 、关节运动距离 f_q 和轨迹长度 f_c 随遗传代数的增加而趋于稳定值;如图8~10所示,关节角度、速度和加速度函数都是连续的曲线;如图11所示,各关节的力矩均在各自允许最大力矩范围之内。

[0253] 实施例2

[0254] 一种基于遗传算法的移动机械臂轨迹规划优化方法。本实施例是自由度为一的移动机械臂,该移动机械臂由一个固定连杆和一个在平面内运动的活动连杆组成。所有的连杆均采用旋转副连接,关节轴垂直于连杆平面。

[0255] 由于移动机械臂是通过移动末端执行器E点来执行任务的,为了描述位置,引入坐标系 xoy ,其中 x 轴与底座连杆平行,坐标原点与第一个关节重合,末端执行器的位置用坐标 (x_e, y_e) 表示。为方便叙述,规定连杆的长度即相邻关节轴的间距,表示为 L_1 ,设固定在底座连杆(连杆0)上的连杆1由执行器1驱动,连杆1与坐标系横轴 x 形成 θ_1 。

[0256] 本实施例的移动机械臂轨迹规划优化方法如图1所示,其具体步骤是:

[0257] 步骤一、建立自由度为一的移动机械臂的正运动学模型和逆运动学模型

[0258] 自由度为一的移动机械臂正运动学模型包括末端执行器位置数学模型和末端执行器的方位 Φ_e 的数学模型,其中:

[0259] 末端执行器位置数学模型为

$$[0260] \quad x_e = L_1 \cos \theta_1 \quad (1)$$

$$[0261] \quad y_e = L_1 \sin \theta_1 \quad (2)$$

[0262] 末端执行器的方位 Φ_e 的数学模型为

$$[0263] \quad \Phi_e = \theta_1 \quad (3)$$

[0264] 自由度为一的移动机械臂逆运动学模型的机械臂关节角度数学模型为

$$[0265] \quad \theta_1 = \alpha - \gamma \quad (5)$$

[0266] 步骤二、除 $n=1$ 和 $m=1$ 外,其余同实施例1。

[0267] 步骤三、除选取轨迹优化的目标为 $[\theta_{m1}, \Phi_{me}, \theta_{m1}, t_1, t_2]$ 外,其余同实施例1。

[0268] 步骤四、除下述技术参数外,其余同实施例1:

[0269] 机械臂连杆长度为 $L_1=1$,权系数分别为 $[\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4]=[2, 2, 2, 1]$;关节的最大力矩为 $\tau_{1max}=45\text{Nm}$,初始时刻的速度、加速度为零和终止时刻的速度、加速度为零,优化目标 $[\theta_{m1}, \Phi_{me}, \theta_{m1}, t_1, t_2]$ 约束范围为

$$[0270] \quad -\pi \leq \theta_1 \leq \pi \text{ rad}$$

$$[0271] \quad -\pi \leq \Phi_e \leq \pi \text{ rad}$$

$$[0272] \quad -\pi/4 \leq \dot{\theta}_1 \leq \pi/4 \text{ rad/sec} \quad (17)$$

$$[0273] \quad 1 \leq t_1 \leq 8 \text{ sec}$$

$$[0274] \quad 1 \leq t_2 \leq 8 \text{ sec}$$

[0275] 式(17)中: θ_1 表示移动机械臂连杆1与坐标系横轴 x 的夹角;

[0276] $\dot{\theta}_1$ 表示移动机械臂关节1的速度；

[0277] Φ_e 表示移动机械臂末端执行器的方位；

[0278] t_1 表示起点到中间点的运行时间；

[0279] t_2 表示中间点到终点的运行时间。

[0280] 在本实施例中，基于遗传算法的移动机械臂轨迹优化的目标 $[\theta_{m1}, \Phi_{me}, \theta_{m1}, t_1, t_2]$ 依次为：0.6671, 1.1514, 0.6520, 0.3629, 0.3502, 移动机械臂末端执行器的轨迹长度 $f_c=1.2120$, 总的关节运动距离 $f_q=1.1520$, 总的超调力矩 $f_{ot}=0$, 总的运行时间 $t_T=0.7131$ 。

[0281] 实施例3

[0282] 一种基于遗传算法的移动机械臂轨迹规划优化方法。本实施例为八自由度移动机械臂，该移动机械臂由一个固定连杆和八个在平面内运动的活动连杆组成。所有的连杆均采用旋转副连接，关节轴垂直于连杆平面。

[0283] 由于移动机械臂是通过移动末端执行器E点来执行任务的，为了描述位置，引入坐标系xoy，其中x轴与底座连杆平行，坐标原点与第一个关节重合，末端执行器的位置用坐标 (x_e, y_e) 表示。为方便叙述，规定连杆的长度即相邻关节轴的间距，分别表示为 L_1, L_2, \dots, L_8 ，设固定在底座连杆（连杆0）上的连杆1由执行器1驱动，连杆1与坐标系横轴x形成 θ_1 ，执行器2驱动固定在连杆1上的连杆2，连杆2相对于连杆1的夹角为 θ_2 ，执行器3驱动固定在连杆2上的连杆3，连杆3相对于连杆2的夹角为 θ_3 ，执行器4驱动固定在连杆3上的连杆4，连杆4相对于连杆3的夹角为 θ_4 ，执行器5驱动固定在连杆4上的连杆5，连杆5相对于连杆4的夹角为 θ_5 ，执行器6驱动固定在连杆5上的连杆6，连杆6相对于连杆5的夹角为 θ_6 ，执行器7驱动固定在连杆6上的连杆7，连杆7相对于连杆6的夹角为 θ_7 ，执行器8驱动固定在连杆7上的连杆8，连杆8相对于连杆7的夹角为 θ_8 。

[0284] 本实施例的移动机械臂轨迹规划优化方法如图1所示，其具体步骤是：

[0285] 步骤一、建立八自由度移动机械臂的正运动学模型和逆运动学模型

[0286] 八自由度移动机械臂正运动学模型包括末端执行器位置数学模型和末端执行器的方位 Φ_e 的数学模型，其中：

[0287] 末端执行器位置数学模型为

$$[0288] \quad x_e = L_1 \cos \theta_1 + L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) + \dots + L_8 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \dots + \theta_8) \quad (1)$$

$$[0289] \quad y_e = L_1 \sin \theta_1 + L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) + \dots + L_8 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \dots + \theta_8) \quad (2)$$

[0290] 末端执行器的方位 Φ_e 的数学模型为

$$[0291] \quad \Phi_e = \theta_1 + \theta_2 + \dots + \theta_8 \quad (3)$$

[0292] 八自由度移动机械臂逆运动学模型的机械臂关节角度数学模型为

$$[0293] \quad \begin{aligned} \theta_1 &= \alpha - \gamma \\ \theta_2 &= \pi - \beta \\ &\vdots \\ \theta_8 &= \Phi_e - \theta_1 - \theta_2 - \dots - \theta_7 \end{aligned} \quad (5)$$

[0294] 步骤二、除 $n=8$ 和 $m=1$ 外，其余同实施例1。

[0295] 步骤三、除选取轨迹优化的目标为 $[\theta_{m1}, \theta_{m2}, \dots, \theta_{m8}, \Phi_{me}, \theta_{m1}, \theta_{m2}, \dots, \theta_{m8}, t_1, t_2]$ 外，其余同实施例1。

[0296] 步骤四、除下述技术参数外,其余同实施例1:

[0297] 机械臂连杆长度分别为 $L_1=1, L_2=1, L_3=1, L_4=1, L_5=1, L_6=1, L_7=0.5$ 和 $L_8=0.5$,权系数分别为 $[\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4]=[2, 2, 2, 1]$;八个关节的最大力矩分别为 $\tau_{1\max}=45\text{Nm}$ 、 $\tau_{2\max}=40\text{Nm}$ 、 $\tau_{3\max}=35\text{Nm}$ 、 $\tau_{4\max}=30\text{Nm}$ 、 $\tau_{5\max}=25\text{Nm}$ 、 $\tau_{6\max}=20\text{Nm}$ 、 $\tau_{7\max}=15\text{Nm}$ 和 $\tau_{8\max}=10\text{Nm}$,初始时刻的速度、加速度为零和终止时刻的速度、加速度为零,优化目标

$[\theta_{m1}, \theta_{m2}, \dots, \theta_{m8}, \Phi_{me}, \theta_{m1}, \theta_{m2}, \dots, \theta_{m8}, t_1, t_2]$ 约束范围为

[0298] $-\pi \leq \theta_i \leq \pi \text{ rad} (i=1, 2, \dots, 8)$

[0299] $-\pi \leq \Phi_e \leq \pi \text{ rad}$

[0300] $-\pi/4 \leq \dot{\theta}_i \leq \pi/4 \text{ rad/sec} (i=1, 2, \dots, 8)$ (17)

[0301] $1 \leq t_1 \leq 8 \text{ sec}$

[0302] $1 \leq t_2 \leq 8 \text{ sec}$

[0303] 式(17)中: θ_i 表示当 $i=1$ 时移动机械臂连杆1与坐标系横轴x的夹角和

[0304] 当 $i=2\sim 8$ 时移动机械臂连杆i与连杆i-1的夹角;

[0305] Φ_e 表示移动机械臂末端执行器的方位,

[0306] t_1 表示起点到中间点的运行时间,

[0307] t_2 表示中间点到终点的运行时间;

[0308] 在本实施例中,基于遗传算法的移动机械臂轨迹优化的目标

$[\theta_{m1}, \theta_{m2}, \dots, \theta_{m8}, \Phi_{me}, \theta_{m1}, \theta_{m2}, \dots, \theta_{m8}, t_1, t_2]$ 依次为:0.8965,1.2431,1.3458,1.4592,1.5689,-0.1568,-1.1652,-0.6589,-0.3985,3.1414,0.7820,0.6201,0.5868,0.4658,0.3706,0.2694,0.1233,0.0656,0.0322,3.4887,5.1006,移动机械臂末端执行器的轨迹长度 $f_c=8.9565$,总的关节运动距离 $f_q=3.4503$,总的超调力矩 $f_{ot}=0$,总的运行时间 $t_T=8.5893$ 。

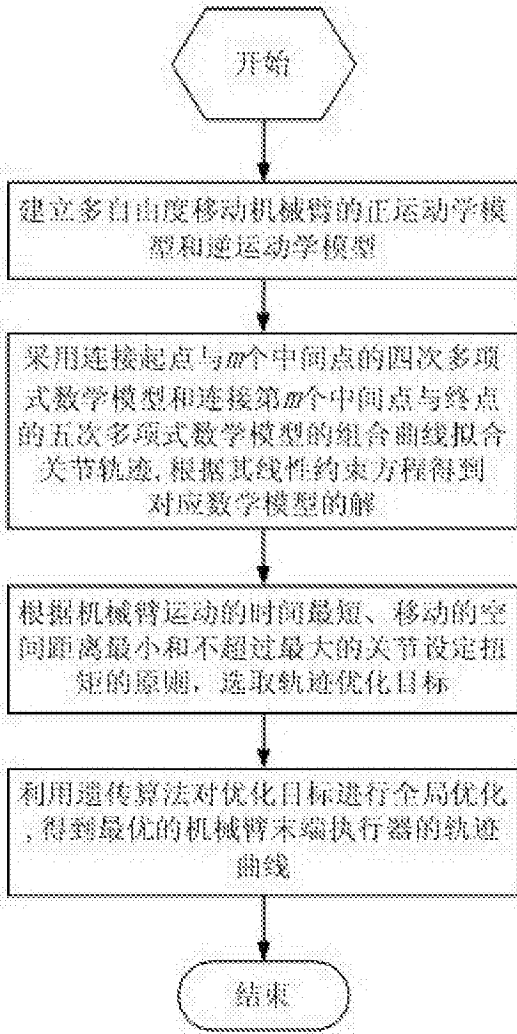


图1

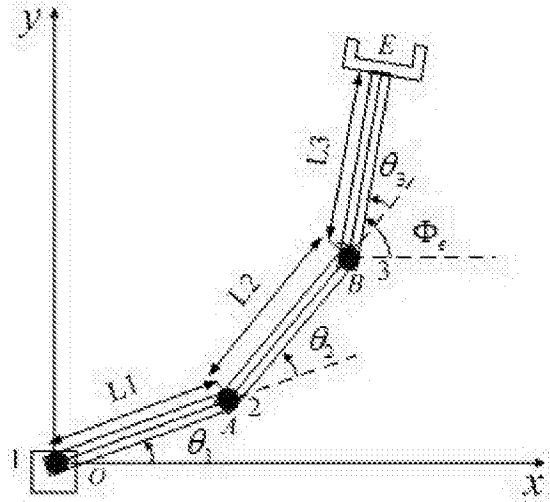


图2

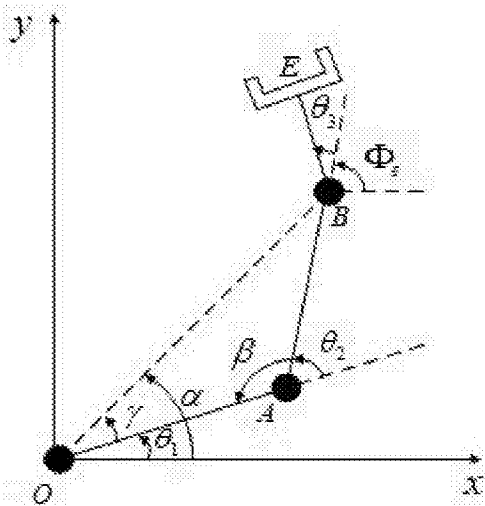


图3

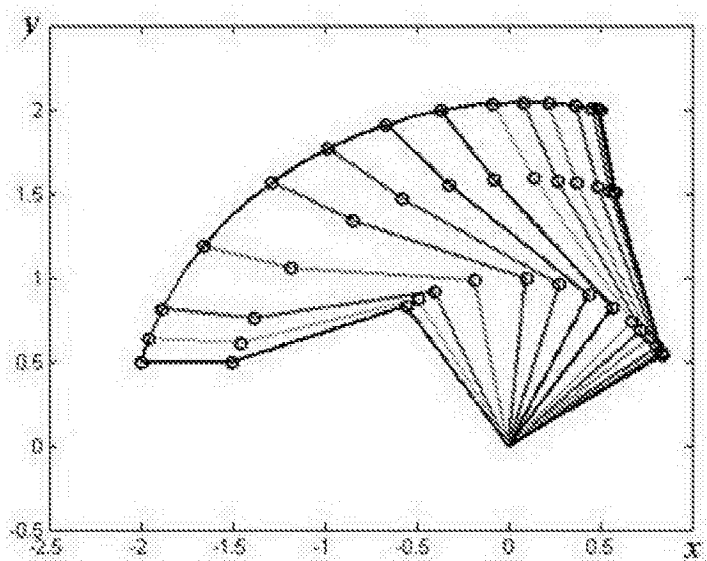


图4

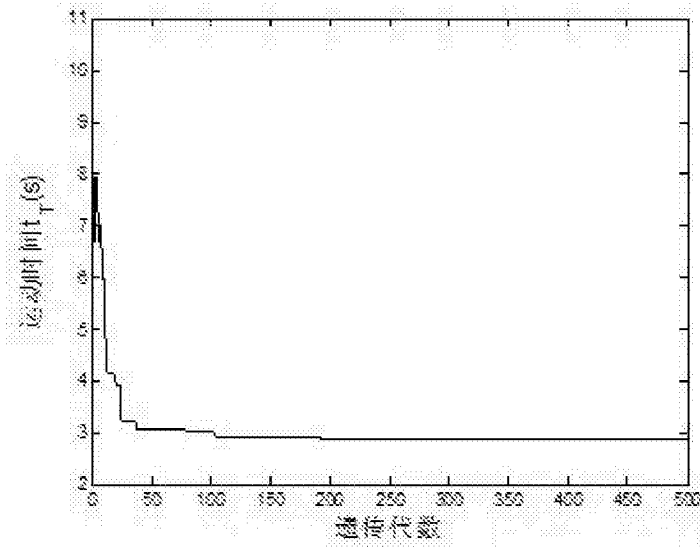


图5

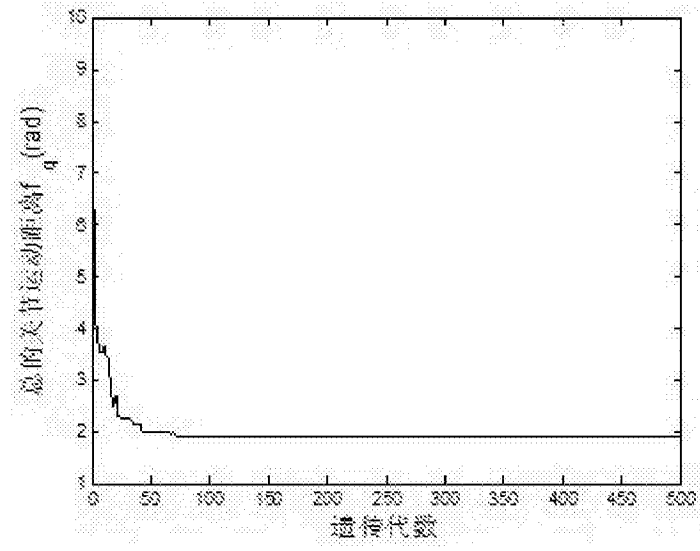


图6

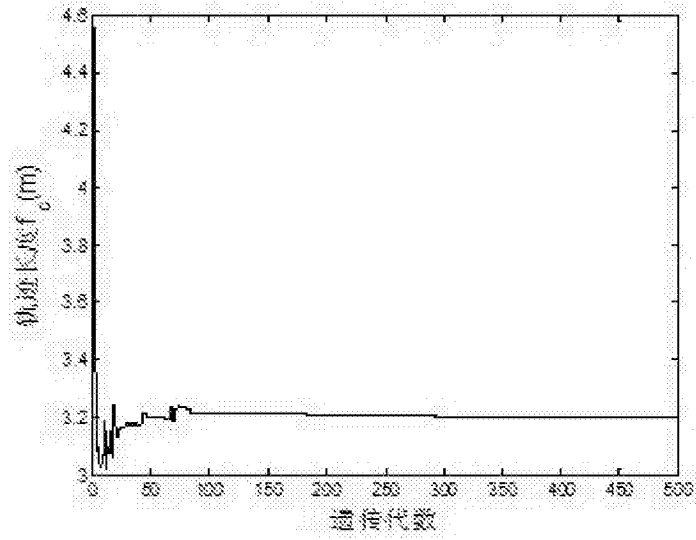


图7

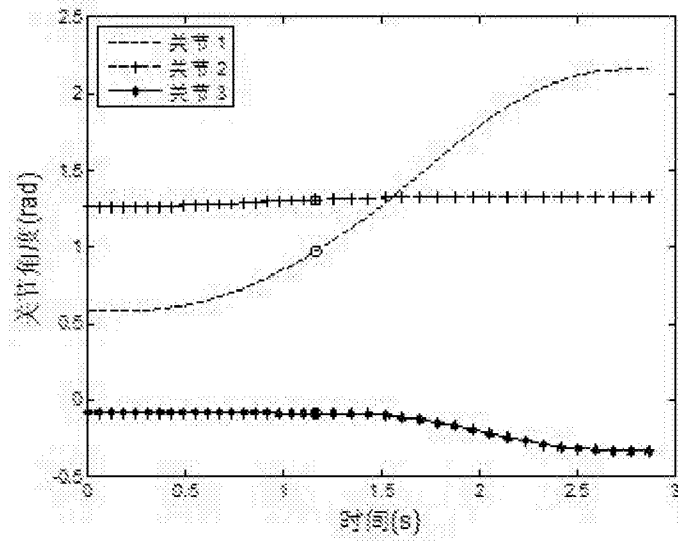


图8

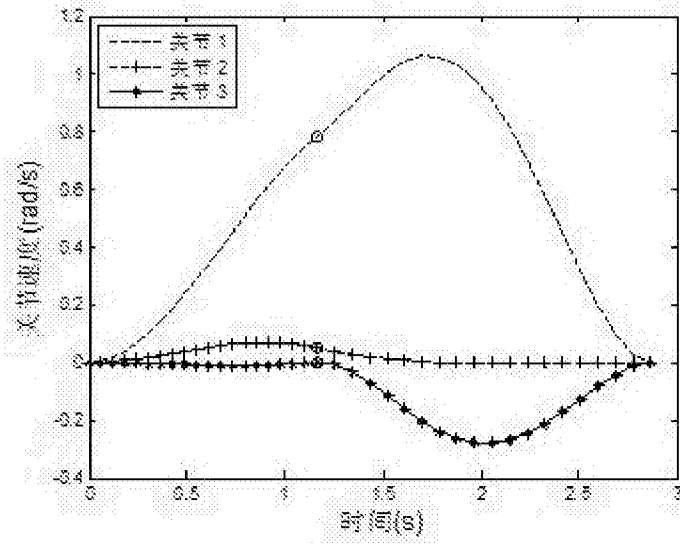


图9

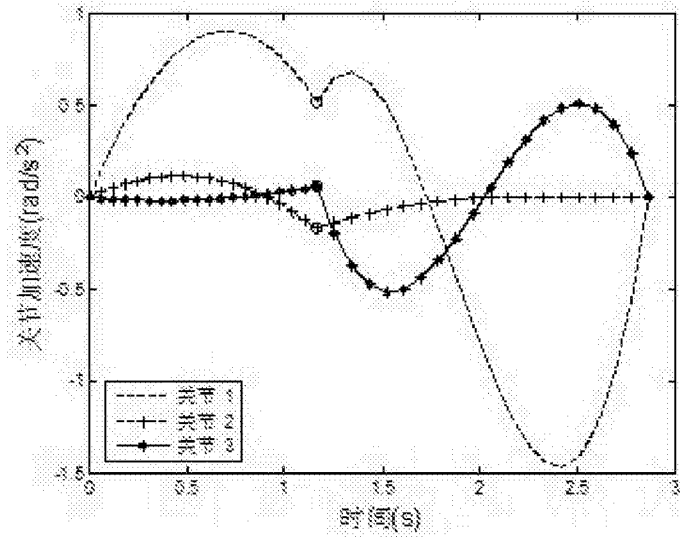


图10

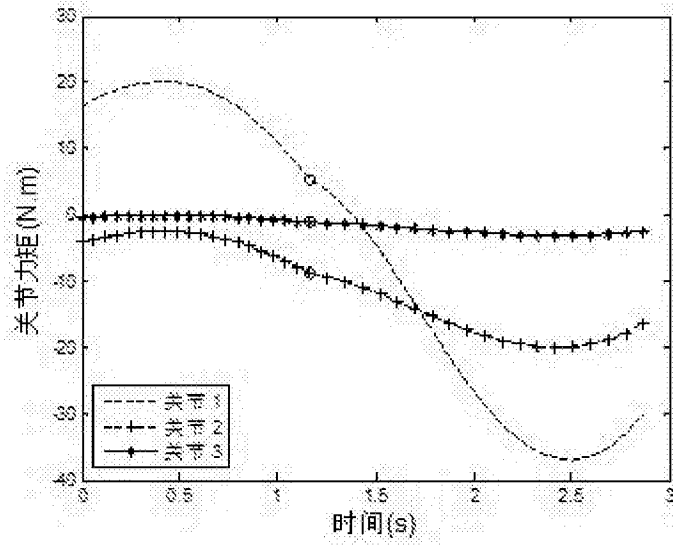


图11