

基于遗传算法的机器人加工位姿优化研究

王昊,张得礼,王宏涛

(南京航空航天大学 机电学院,江苏 南京 210016)

摘要:针对工业机器人的加工效果具有位姿依赖性这一特点,基于机器人性能评价指标和遗传算法提出一种优化机器人加工位姿的方法。建立机器人正运动学模型和静刚度模型并选取机器人运动性能评价指标和刚度性能评价指标;通过蒙特卡罗法得到机器人运动性能、刚度性能在关节空间和笛卡儿空间的分布图,通过分布图研究机器人各关节对机器人运动性能、刚度性能的影响;基于机器人运动性能评价指标和刚度性能评价指标设计适应度函数,使用遗传算法对机器人加工位姿进行优化,优化后机器人性能得到了提升。

关键词:工业机器人;加工位姿择优;运动学性能;刚度性能;遗传算法

中图分类号:TP242.2 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2021)06-0174-04

Research on Processing Posture Optimization of Robots Based on Genetic Algorithm

WANG Hao, ZHANG Deli, WANG Hongtao

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: To address the posture dependence of industrial robot in the machining process, a posture optimization methodology of robots based on performance evaluation indexes and genetic algorithm is presented. The conventional stiffness and kinematic models of the robots are established, and their performance indexes are presented. By Monte Carlo method, these two performance distribution maps in joint space and the Cartesian space are drawn to study the influence of each joint on these two performances. A fitness function is designed based on these two performance evaluation indexes, and genetic algorithm is used to optimize processing posture of the robot, which brings about the improvement of the robot performance.

Keywords: industrial robot; posture optimization; kinematic performance index; stiffness performance index; genetic algorithm

0 引言

工业机器人由于其工作灵活、可移动和高重复定位精度等特点被广泛应用于搬运、喷漆、铣削、焊接、制孔等工业加工领域。机器人与 CNC 机床一样具有多轴功能,然而由于工业机器人独特的悬臂梁结构,与 CNC 机床相比刚度相对较差。CNC 机床的刚度通常 $>50 \text{ N}/\mu\text{m}^{[1]}$,而工业机器人的刚度仅为 CNC 机床的 $1/50 \sim 1/20$,提高工业机器人的刚度对提高加工质量具有重要影响。工业机器人末端刚度由机器人关节刚度和机器人位姿决定^[2],所以对于型号已定的工业机器人,其位姿对末端刚度有着决定性作用。此外,机器人传递力和运动的运动学性能、规避奇点的能力对机器人的加工性能也有较大影响^[3]。国内外学者有关研究表明,可以通过寻优机器人加工位姿达到提高机器人末端刚度性能和运动学性能的目的。CHEN S F 等建立了工业机器人末端刚度和关节刚度、机器人姿态的关系,并表明末端刚度随机器人姿态变化而变化^[4];ZARGARBASHI S H H 等人提出一种与任务相关的优化方法,对机器人姿态进行寻优,从而选取满足任务要求的

最优加工姿态^[5];KHAN W 等人基于机器人运动性能评价指标,研究了机器人不同运动性能对机器人加工轨迹的影响^[6]。然而上述优化方法仅考虑优化机器人的刚度性能或机器人的运动性能,并没有将二者综合考虑。LIN Y 等人在对机器人加工位姿的优化时,对机器人的运动性能和刚度性能皆进行了研究,但其选择优化位姿的方式是在性能分布图中直接选择机器人关节角,未使用优化算法^[7]。

本文基于机器人性能指标并结合遗传算法对机器人加工位姿进行优化。

1 机器人运动性能对加工位姿的影响

1.1 机器人正运动学模型

埃斯顿 ER30 机器人为六自由度关节式工业机器人,且所有关节均为旋转副。按照 D-H 参数法建立机器人 D-H 参数模型如表 1 所示。表 1 中,关节 1-6 分别代表机器人的 6 个关节; θ_i 为关节 i 的关节角度; d_i 为关节 i 的偏

基金项目:国家科技重大专项(2018ZX04014001)

第一作者简介:王昊(1996—),男,安徽蚌埠人,硕士研究生,研究方向为工业机器人控制算法。

距,即连杆 $i-1$ 与连杆 i 的距离; α_i 为关节 $i-1$ 与关节 i 轴线之间的夹角; a_{i-1} 为关节 $i-1$ 与关节 i 轴线之间公法线距离。

表1 ER30 机器人 D-H 参数

关节 i	θ_i/rad	d_i/mm	a_{i-1}/mm	$\alpha_i/(\text{°})$
1	0	0	200	-90
2	0	0	800	0
3	0	0	165	-90
4	0	899	0	90
5	0	0	0	-90
6	0	220	0	0

基于机器人 D-H 参数模型可得到从基座到机器人末端的变换矩阵 0T_6 :

$${}^0T_6 = {}^0T_1 {}^1T_2 \cdots {}^5T_6 = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $[n_x \ n_y \ n_z]^T$ 表示机器人末端 x 轴在基坐标系中的方向矢量; $[o_x \ o_y \ o_z]^T$ 表示机器人末端 y 轴在基坐标系中的方向矢量; $[a_x \ a_y \ a_z]^T$ 表示机器人末端 z 轴在基坐标系中的方向矢量; $[p_x \ p_y \ p_z]^T$ 表示机器人末端在基坐标系中的位置矢量。

1.2 机器人运动性能评价指标

机器人运动性能是指机器人系统传递力和运动的能力,机器人的运动性能可以通过运动性能指标来评价。机器人运动性能指标除了可以评价机器人的运动性能还可以直观地衡量机器人当前位姿与奇异点距离的远近。本文选择基于条件数^[8]的机器人运动性能的评价指标,条件数定义见式(2),机器人运动性能评价指标 K_M 见式(3)。

$$K(J_N) = \frac{1}{n} \sqrt{\frac{\text{tr}(J_N J_N^T)}{\text{tr}(J_N J_N^T)^{-1}}} \quad (2)$$

$$K_M = 1/K(J_N) \times 100\% \quad (3)$$

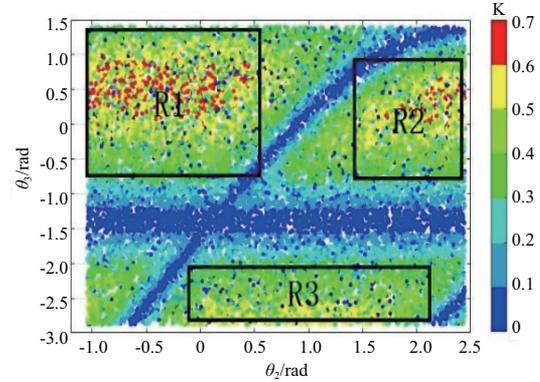
式中: n 为雅克比矩阵的维数,本文机器人为 6R 机器人,所以 $n=6$; $\text{tr}(J_N)$ 为机器人雅克比矩阵的迹; J_N 为雅克比矩阵的规范标准型。

1.3 各关节角对运动性能的影响

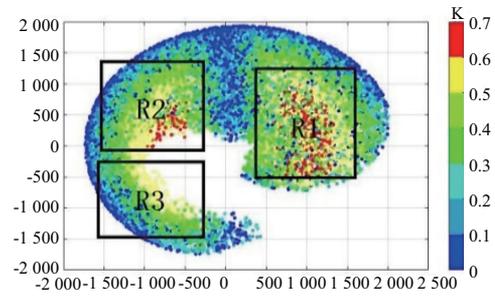
在机器人的 6 个关节角中, θ_1 、 θ_6 对机器人末端运动性能无影响^[7],所以设置 $\theta_1=0$ 、 $\theta_6=0$, 仅需研究 θ_2 、 θ_3 、 θ_4 、 θ_5 对机器人末端运动性能的影响。式(1)中机器人空间位置 p_x 、 p_y 、 p_z 主要随 θ_2 、 θ_3 变化而变化,机器人末端姿态 n 、 o 、 a 主要随 θ_4 、 θ_5 变化而变化,所以可通过 K_M 在 2、3 关节空间中的变化,研究机器人空间位置变化对 K_M 的影响。通过 K_M 在 4、5 关节空间中的变化,研究姿态变化对 K_M 影响。

为研究 θ_2 、 θ_3 对 K_M 的影响,通过蒙特卡洛法绘制 K_M

在 2、3 关节空间的分布如图 1(a) 所示。图 1(b) 为机器人末端运动性能在笛卡儿空间的分布。在 R1、R2、R3 三个矩形区域中机器人的末端运动性能较好。通常情况下,机器人进行加工时,待加工工件放于机器人前方,所以当机器人进行加工时,机器人末端通常处在 R1 区域,此区域内的机器人加工位姿符合加工实际且机器人运动性能较佳,此时 $\theta_2 \in [-1, 0.5]$ 、 $\theta_3 \in [-0.8, 1.5]$ 。



(a) 机器人运动性能在 2、3 关节空间的分布



(b) R1、R2、R3 在笛卡儿空间的区域

图1 机器人运动性能在关节空间中的分布

同理,绘制 K_M 在 4、5 关节空间的分布如图 2 所示。由图 2 可知, K_M 主要随 θ_5 变化而变化。在考虑姿态对 K_M 的影响时,只需优化 θ_5 的取值,以避免机器人四轴与六轴平行导致接近奇异点,机器人末端即可达到较好的运动性能。

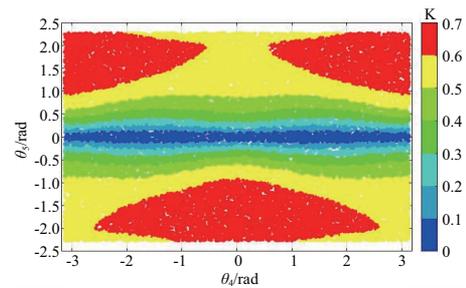


图2 机器人运动性能 4、5 关节空间中的分布

综合上文分析,当机器人四轴与六轴不平行远离奇异时, θ_2 、 θ_3 变化导致的 K_M 变化范围为 $[0, 0.7]$, θ_4 、 θ_5 变化导致的 K_M 变化范围为 $[0.5, 0.7]$ 。机器人末端运动性能主要受机器人位置变化即 θ_2 、 θ_3 变化的影响,机器人姿态变化即 θ_4 、 θ_5 变化对机器人运动性能影响较小。

2 机器人刚度性能对加工位姿的影响

2.1 机器人静刚度模型

对于6R串联机器人,加工时其末端误差主要来自于机器人关节的受力变形^[9]。基于此可以建立机器人末端笛卡儿刚度矩阵 \mathbf{K} 与关节刚度矩阵 \mathbf{K}_θ 的映射关系^[10]:

$$\mathbf{K} = \mathbf{J}^{-\text{T}} \mathbf{K}_\theta \mathbf{J}^{-1} \quad (4)$$

式中: \mathbf{J} 为机器人雅克比矩阵; $\mathbf{K}_\theta = \text{diag}([K_{\theta_1}, K_{\theta_2}, K_{\theta_3}, K_{\theta_4}, K_{\theta_5}, K_{\theta_6}])$, 为机器人关节刚度矩阵。

由式(4)可知,机器人的末端刚度与机器人的雅克比矩阵 \mathbf{J} 和关节刚度矩阵 \mathbf{K}_θ 有关。机器人的雅克比矩阵 \mathbf{J} 仅由机器人位姿决定,所以机器人末端刚度具有位姿依赖性。

2.2 机器人刚度评价指标

为减少计算难度和计算误差,引入机器人柔度模型:

$$\mathbf{K}^{-1} = \mathbf{C} = \mathbf{J} \mathbf{K}_\theta^{-1} \mathbf{J}^{\text{T}} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{\text{tt}} & \mathbf{C}_{\text{tr}} \\ \mathbf{C}_{\text{tr}}^{\text{T}} & \mathbf{C}_{\text{rr}} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: \mathbf{C}_{tt} 为力-线位移刚度矩阵; \mathbf{C}_{tr} 为力-角位移刚度矩阵; $\mathbf{C}_{\text{tr}}^{\text{T}}$ 为力矩-线位移刚度矩阵; \mathbf{C}_{rr} 为力矩-角位移刚度矩阵。

由于机器人末端所受力矩带来的末端变形远小于于力带来的末端变形。机器人末端的角位移也远小于于线位移,所以机器人刚度性能评价指标 K_s 可简化为^[11]

$$K_s = 1 / \sqrt{\det(\mathbf{C}_{\text{tt}})} \quad (6)$$

2.3 各关节角对刚度性能的影响

由参考文献[7]可知, θ_1 、 θ_6 对机器人刚度评价指标 K_s 无影响,设置 $\theta_1 = 0$, $\theta_6 = 0$ 。机器人刚度性能在 2,3 关节空间的映射如图 3 所示。对比图 3(a) 和图 3(b), 当 θ_4 、 θ_5 变化时,机器人末端刚度性能在 2,3 关节空间的分布基本不变。当机器人运动性能较好,即 $\theta_2 \in [-1, 0.5]$ 、 $\theta_3 \in [-0.8, 1.2]$ 时,由图可知,机器人的刚度性能在 $\theta_2 \rightarrow 0.5$, $\theta_3 \rightarrow -0.8$ 时较好。

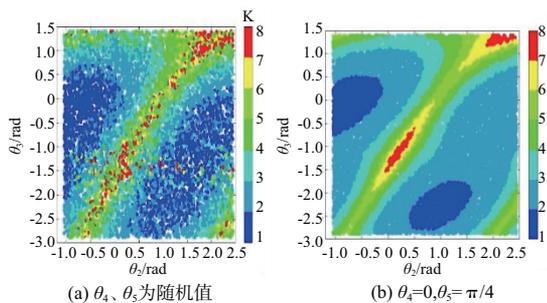


图 3 2,3 关节空间的机器人末端刚度性能

图 4 为机器人末端刚度性能在机器人 4,5 关节空间中的映射。由图 4 可知,当 θ_2 、 θ_3 为随机值时,机器人刚度性能分布并无明显规律; θ_2 、 θ_3 为固定值时,机器人刚度性能分布呈现明显规律,此时 K_s 取值区间为 $[2, 4]$ 。结合图 3, 无论 θ_4 、 θ_5 为何值时,机器人刚度性能分布规律不

变, K_s 取值区间为 $[1, 8]$ 。由此可知 θ_2 、 θ_3 对机器人刚度性能有较大影响, θ_4 、 θ_5 对机器人刚度性能影响较小,即相较于机器人末端的位置变化,机器人末端的姿态变化对机器人刚度性能影响较小。

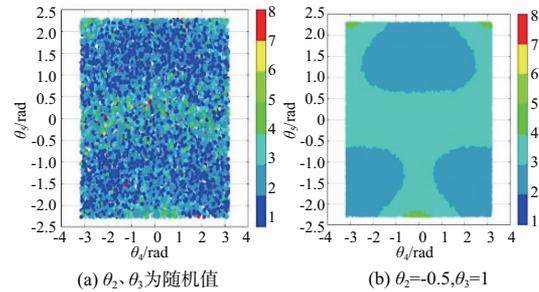


图 4 4,5 关节空间机器人末端刚度性能

3 基于遗传算法的机器人加工位姿寻优

根据上文的分析,可以归纳得到机器人加工位姿优化问题的数学模型,如式(7)所示。这是一个多目标、多约束且目标数学表达式不可导的优化问题,解决此优化问题需要在变量全局范围内对最优解进行搜索。遗传算法对优化问题没有太多数学要求,其较强的全局寻优能力的特点符合本文优化问题的要求。所以选用遗传算法实现机器人位姿优化。

$$\begin{cases} \max & K_M(\theta) \\ \max & K_s(\theta) \\ \text{s.t.} & \theta_{\text{imin}} \leq \theta_i \leq \theta_{\text{imax}} \quad 1 \leq i \leq 6 \end{cases} \quad (7)$$

1) 使用遗传算法寻优机器人加工位姿需先设计变量和适应度函数,设置选择、交叉、变异算子,设置终止条件,步骤如下。

步骤 1: 设计变量和取值范围。机器人末端运动性能和刚度性能主要受机器人位姿影响,其中 θ_1 、 θ_6 对机器人末端运动性能和刚度性能均无影响,所以待优化变量为 θ_2 、 θ_3 、 θ_4 、 θ_5 。结合上文分析设置各变量取值范围为:

$$\theta_2 \in [-1, 0.5], \theta_3 \in [-0.8, 1.2], \theta_4 \in [-\pi, \pi],$$

$$\theta_5 \in [-2.5, -0.5] \cup [0.5, 2.5].$$

步骤 2: 设计适应度函数。适应度函数有两个评价指标 K_M 和 K_s , 以 K_M 和 K_s 的和作为适应度函数。参考文献[12]考虑到在加工时机器人的运动性能与刚度性能对加工效果都有明显影响,设置权重 $\omega_1 = 2/3$, $\omega_2 = 1/3$ 。最终的适应度函数如式(8)所示。

$$\text{Fit}(\theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5) = 0.0001\omega_1 K_s + \omega_2 K_M \quad (8)$$

步骤 3: 设置选择、交叉、变异算子。使用轮盘赌选择法对种群中的个体进行选择。为快速淘汰低适应度值的个体,交叉方法为均匀交叉,交叉算子 $p_c = 0.8$ 。变异算子 p_m 通常在 $[0.001, 0.1]$ 区间取值,本文变异算子 $p_m = 0.05$ 。

步骤 4: 设置终止条件。遗传算法终止条件有多种,本文以达到目标代数作为终止条件,当迭代代数达到 50 代时停止优化。

2) 完成以上设置后,使用遗传算法对机器人加工位

姿进行优化,步骤如下所示。

步骤 1:生成初始种群。随机生成符合取值范围的 25 组关节角 $\theta_{2i}, \theta_{3i}, \theta_{4i}, \theta_{5i} (i=1 \sim 25)$, 并以二进制编码的方式将 25 组关节角编译成 25 个染色体作为初始种群。

步骤 2:计算 Fit。计算初始种群中 25 个染色体 $\text{Fit}(\theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5)$ 。

步骤 4:判断是否终止遗传算法。若代数 $g < 50$, 则 $g+1$, 进行步骤 5; 若代数 $g > 50$, 则停止优化, 输出优化结果。

步骤 5:遗传操作生成下一代子群。根据当前种群中各染色体 Fit 值, 对种群中所有个体进行选择、复制、交叉以得到新的种群。进行步骤 2。

运行遗传算法得到的优化结果如表 2 所示。此优化结果对应的机器人位姿如图 5 所示。优化位姿与随机位姿的性能指标值如表 3 所示, 相较于随机位姿优化后的位姿各项性能得到了较大提升。

表 2 遗传算法优化结果 ($\theta_1, \theta_6 = 0$)

关节角 i	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5
度数/rad	0.45	-0.47	1.42	-2.00



图 5 优化后的机器人加工位姿

表 3 优化位姿与随机位姿的各评价指标值

位姿	$K_s / (\text{kN/mm})$	K_M	$\text{Fit}(\theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5)$
最优位姿	5.40	0.31	6.95
随机位姿	2.54	0.32	4.14

4 结语

机器人 6 个关节中, θ_2, θ_3 对机器人运动性能影响较大, θ_4, θ_5 对机器人运动性能影响较小, θ_1, θ_6 对机器人运动性能无影响。当 $\theta_2 \in [-1, 0.5]$, $\theta_3 \in [-0.8, 1.2]$, $\theta_4 \in [-\pi, \pi]$, $\theta_5 \in [-2.5, -0.5] \cup [0.5, 2.5]$ 时机器人运

动性能较好且机器人位姿符合加工实际。

使用遗传算法对加工位姿进行优化, 设计了一种综合机器人运动性能评价指标和机器人刚度性能评价指标的适应度函数, 并通过系数设计调整两种性能在优化过程中的比重, 最终得到了一个符合加工实际且性能较好的机器人加工位姿。

参考文献:

- [1] ABELE E, ROTHENBÜCHER S, WEIGOLD M. Cartesian compliance model for industrial robots using virtual joints[J]. Production Engineering, 2008, 2(3):339-343.
- [2] PAN Z X, ZHANG H, ZHU Z Q, et al. Chatter analysis of robotic machining process[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 173(3):301-309.
- [3] GOSSELIN C M, ANGELES J. A global performance index for the kinematic optimization of robotic manipulators[J]. Journal of Mechanical Design, 1991, 113(3):220-226.
- [4] CHEN S F, KAO I. Conservative congruence transformation for joint and Cartesian stiffness matrices of robotic hands and fingers[J]. International Journal of Robotics Research, 2000, 19(9):835-847.
- [5] ZARGARBASHI S H H, KHAN W, ANGELES J. Posture optimization in robot - assisted machining operations [J]. Mechanism and Machine Theory, 2012, 51:74-86.
- [6] ZARGARBASHI S H H, KHAN W, ANGELES J. The Jacobian condition number as a dexterity index in 6R machining robots[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2012, 28(6):694-699.
- [7] LIN Y, ZHAO H, DING H. Posture optimization methodology of 6R industrial robots for machining using performance evaluation indexes[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2017, 48:59-72.
- [8] KHAN W A, ANGELES J. The kinetostatic optimization of robotic manipulators; the inverse and the direct problems [J]. Journal of Mechanical Design, 2006, 128(1):168-178.
- [9] 覃欢欢. 6R 工业机器人整体刚度建模与弹性动力学分析[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.
- [10] WANG J J, ZHANG H, FUHLBRIGGE T. Improving machining accuracy with robot deformation compensation[J]. 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2009:3826-3831.
- [11] GUO Y J, DONG H Y, KE Y L. Stiffness-oriented posture optimization in robotic machining applications[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2015, 35:69-76.
- [12] 布音. 工业机器人精密制孔系统刚度特性研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017.

收稿日期: 2020-10-20