

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2024.03.020

冗余铺放机器人的自运动流形及逆解优化研究*

李 奎, 徐孝彬, 王婷婷, 刘 波
(河海大学 机电工程学院, 江苏 常州 213000)

摘要: 针对用于复合材料铺放成型的八自由度冗余机器人系统的逆运动学问题, 提出了一种求解其自运动流形及逆解优化的算法。首先, 基于位姿分离思想定义了位置子流形和姿态子流形, 采用几何求解法得到了基于自运动变量的参数化方程形式的位置子流形和姿态子流形; 然后, 根据机器人的关节约束和实际铺放工艺过程, 对给定的铺放位姿进行了位置子流形和姿态子流形配对的仿真, 并用流形中若干组逆解通过正向运动学得到了末端位姿矩阵(其结果均与给定位姿相符, 从而验证了自运动流形求解过程的正确性); 最后, 在完成自运动流形求解的基础上, 从机械臂运动的平滑性和关节运动变化量两个方面出发, 提出了一种基于自运动变量参数化方程的全局优化目标函数; 以飞机尾椎模型为实验研究对象, 对其中一条铺放路径进行了逆解全局优化仿真, 得到了自运动变量和机器人各关节角在铺放路径上的优化曲线, 将仿真结果与一种多目标优化算法进行了比较。研究结果表明: 针对相同的铺放路径, 采用上述优化算法后关节角变化总量降低了 11.25%; 该算法能够有效地求解八自由度冗余铺放机器人系统的自运动流形, 基于全局优化目标函数, 其能够在自运动流形中寻找出自运动变量和机器人各关节的最优解。该算法同样也适用于其他位姿解耦的冗余机器人系统逆解问题的求解。

关键词: 冗余铺放机器人; 八自由度; 几何法; 位姿分离; 自运动流形; 逆解优化

中图分类号: TH-39; TP24

文献标识码: A

文章编号: 1001-4551(2024)03-0551-08

Self-motion manifolds and inverse kinematic optimization of redundant fiber placement robot

LI Kui, XU Xiaobin, WANG Tingting, LIU Bo

(College of Mechanical & Electrical Engineering, Hohai University, Changzhou 213000, China)

Abstract: Aiming at the inverse kinematic problem of 8-DOF redundant robotic manipulator system which was used for automatic fiber placement, a kind of algorithm was proposed for obtaining its self-motion manifolds and optimizing inverse kinematics. Firstly, position sub-manifolds and orientation sub-manifolds were defined based on the idea that position and orientation of end-effector could be decoupled, and position and orientation sub-manifolds in the form of parameterized formulations were both obtained by geometric methods. Then, according to the joint constraints and actual laying process, position sub-manifolds and orientation sub-manifolds were simulated for given end-effector posture, several inverse kinematic solutions from the manifolds were used to obtain the end-effector posture matrix by positive kinematics, which was consistent with the given posture matrix, so the correctness of self-motion manifolds calculation process was proved. Finally, based on the calculation of self-motion manifolds, a global inverse kinematic optimal objective function was proposed based on the parameterized self-motion formulation considering two aspects of manipulator moving smoothness and total joints motion variation. The aircraft tail was taken as the object of study and one of the laying paths was simulated to get the optimal inverse kinematic curves of self-motion variables and robotic manipulator joint angles. The simulation results were compared with a multi-objective optimization algorithm. The results indicate that the total variation of joints motion is decreased by 11.25% for the same laying path. The algorithm is valid for obtaining the self-motion manifolds and searching optimal solutions for each joint and self-motion variable based on the global optimal objective function, the proposed algorithm

收稿日期: 2023-07-20

基金项目: 江苏省重点研发计划项目(BE2020082-1)

作者简介: 李奎(1982-), 男, 江苏常州人, 硕士, 讲师, 主要从事冗余机器人运动学研究。E-mail: 20061732@hhu.edu.cn

is also fit for the inverse kinematic problem of other redundant robotic systems in which position and orientation are decoupled.

Key words: redundant fiber placement robot; 8-DOF; geometry method; decouple of position and orientation; self-motion manifold; inverse kinematic optimization

0 引 言

因其具有高强度、轻量化、耐疲劳等诸多优点,复合材料构件已经被越来越多地被应用在航空航天、军工等领域^[1-2],因此,行业对复合材料铺放成型装备的要求也越来越高。

冗余铺放机器人逐渐成为复合材料铺放的主流设备。由于逆解的无穷性,冗余机器人在路径规划及避障等方面具有更大的灵活性^[3-6],但冗余特性也为机器人的运动学求解及优化增加了难度。

冗余机器人逆运动学求解的方法主要有代数法^[7-8]、迭代法^[9-10]、几何法^[11-12]和自运动流形法。自运动流形法反映了冗余机器人的运动学本质,给出了逆解的全部构型,因此受到了众多研究者的青睐。

基于自运动流形的性能优化可以得到全局最优解。为此,国内外很多学者针对冗余机器人系统的自运动流形求解及优化进行了大量研究。

MAHMOUD T 等人^[13]对七自由度拟人手臂的构型和相应位姿进行了大量数据采样,从而获得了多个参数化表示的分类流形;但其采样过程较为复杂。MOORE B 等人^[14]利用旋量四元数获得了七自由度 PA10 机械手的参数化的自运动流形;但该方法的计算量较大。PIERRE D 等人^[15]从末端姿态局部小范围调整和参数化自动流形两方面,对七自由度冗余铺放机器人的控制进行了优化,提高了其铺放的效率;但该方法不具有通用性,并不适合其他构型的铺丝机器人。JIUCHUN G 等人^[16]在铺放路径节点对应的流形中动态寻找最短路径,即为相应离散位姿点对应的最优逆解;每个节点的解都要依赖于前面所有节点的解,因此很容易出现错误解,而且求解过程较为复杂。徐朋等人^[17-18]利用 Paden-Kahan 子问题和旋量方法,求解了八自由度铺丝机器人自运动流形,并分别以关节速度变化量最小、关节变化最小以及关节动能最小化为指标,建立了多目标优化函数;但文中并没有给出机械臂各关节优化曲线的仿真结果。赵建文等人^[19]采用几何法和矢量代数,对位姿解耦的七自由度冗余手臂的位置子流形和姿态子流形进行了分析;但其没有进行流形方面的优化研究。葛新锋等人^[20]采用点的自然坐标作为独立的运动参数,对七自由度铺放机器人的自运动流形进行了参数表达;但其没有对流形进行仿

真和验证。栗伟周等人^[21]引入了体积元函数,对七自由度铺丝机器人进行了运动学性能分析。郭娟等人^[22]采用位置和姿态变换矩阵相结合的算法,对自动铺丝机器人进行了逆运动学求解;但其均未涉及到较深入的优化研究。

上述方法有的计算量大、效率低,有的方法不具有通用性,只适合特定构型的冗余机器人求解。

基于上述分析,笔者结合几何法和自运动流形法,首先,利用运算效率较高的几何法求解其自运动流形;其次基于自运动流形进行全局逆解优化(由于铺放质量与机器人的关节运动幅度和加速度变化具有很大关系,为满足铺放质量,建立一种基于自运动流形的全局优化目标函数,将铺放路径变量引入目标优化函数,使得机器人在整条铺放路径上关节运动变化量和加速度变化量之和最小);最后,对飞机尾椎模型的一条铺放路径进行运动学逆解全局优化,以验证优化算法的可行性。

1 系统拓扑结构及坐标系建立

该冗余铺放机器人系统由六自由度库卡机器人 KUKA KR 120 R2900 extra、移动导轨和旋转芯模组成,其系统结构如图 1 所示。

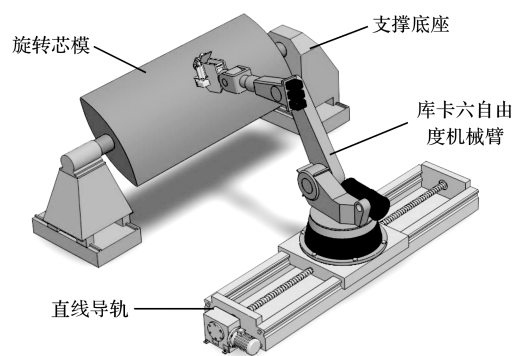


图 1 八自由度铺放机器人系统

Fig. 1 8-DOF fiber placement robotic system

机器人可沿导轨进行直线运动,对旋转的芯模完成复合材料的铺放工作。因此,该铺放系统可等效为一个八自由度的冗余机器人来进行研究。

根据 D-H 法建立系统坐标系如图 2 所示。

图 2 中, $x_m y_m z_m - O_m$ 是芯模固定坐标系 (fixed mold coordinate system, FMCS), $x_{m'} y_{m'} z_{m'} - O_{m'}$ 是芯模旋转坐标系 (rotating mold coordinate system, RMCS),

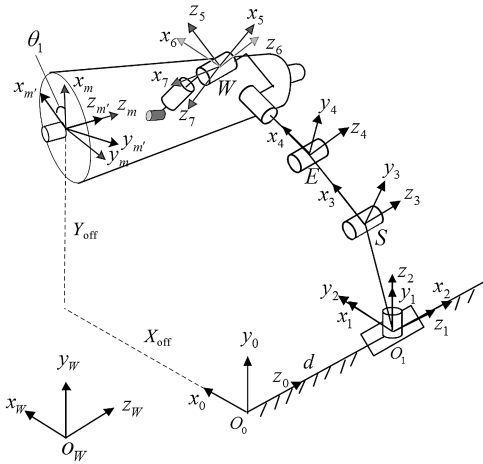


图2 八自由度铺放机器人D-H坐标系

Fig.2 D-H coordinate system of 8-DOF fiber placement robot

$x_0y_0z_0 - O_0$ 为移动导轨零位坐标系, $x_1y_1z_1 - O_1$ 为移动导轨坐标系。 $x_2y_2z_2 - O_2$ 至 $x_7y_7z_7 - O_7$ 为机械臂关节坐标系。

2 自运动流形求解

对冗余系统而言,令 r 为相对冗余自由度个数,则每个自运动流形都是构型空间的 r 维子流形。

定义 r 维向量 $s = \{s_1, s_2, \dots, s_r\}$, 则每个子流形可表示为 $M_i(s)$, 对于末端给定位姿, 其对应的自运动流形可表示为:

$$F^{-1}(x) = \bigcup_i^n M_i(s) \quad (1)$$

式中: n 为自运动的总个数; $M_i(s)$ 为第 i 个自运动子流形。

对于八自由度铺放机器人系统, 其相对冗余自由度个数为2。笔者选取芯模旋转角度 θ_1 和机械臂直线位移 d 定义为冗余变量。因此, 该铺放系统所对应的自运动流形为二维子流形的集合。

对于该冗余系统的自运动流形求解, 笔者采用位姿分离和关节依次运动的思想, 对于给定的末端位姿, 通过计算可以得到机械臂腕点的位置坐标, 通过芯模旋转关节、移动关节和机械臂前3关节的运动, 使机械臂的腕点达到预定位置; 此时, 再通过依次调节机械臂后3关节的运动, 使得末端达到预定姿态。因为铺放头与机械臂最后一个关节固定, 所以根据铺放头的长度和位姿矩阵, 可以得到腕点的位置坐标, 腕部三个转动关节的轴线交于腕点。因为姿态调整时不影响腕部的位置, 所以铺放头末端位姿解耦。

机械臂转动关节空间可表示为 $C_2 \sim C_7$, 芯模旋转关节空间为 C_m , 移动关节空间为 C_1 , 定义位置关节构型空间为 $C_p = C_m \times C_1 \times C_2 \times C_3 \times C_4$ 。末端压辊对应

的位姿相对于芯模旋转坐标系是保持不变的。

根据末端压辊位姿可得到机械臂腕点在 RMCS 下的位置坐标 ${}^m p_w$, 对应的位置子流形可表示为 $M_p = \{\theta_p | f_p(\theta_p) = {}^m p_w^T, \theta_p \in C_p\}$, 其中 f_p 是 C_p 到腕点基于 RMCS 的位置工作空间映射, $\theta_p = [\theta_1 \ d \ \theta_2 \ \theta_3 \ \theta_4]^T$ 。

定义姿态关节构型空间 $C_o = C_5 \times C_6 \times C_7$, 末端压辊位姿矩阵为 ${}^m T_E = [n^T \ o^T \ a^T \ p^T]$, 则末端对应的姿态子流形可表示为 $M_o = \{\theta_o | f(\theta_o, \theta_o) = ({}^m p_w^T, n^T, o^T, a^T), \theta_o \in C_o\}$ 。其中, f 为机构构型空间与工作空间的正向映射, $\theta_o = [\theta_5 \ \theta_6 \ \theta_7]^T$ 。

2.1 位置子流形求解

机器人铺放头末端压辊的位姿由规划的铺放路径决定。定义铺放路径时, 设定 RMCS 与 FMCS 两个坐标系。铺放起始时刻, 两个坐标系重合, 随着铺放过程的进行, FMCS 在世界坐标系里始终保持不变, RMCS 跟随芯模的旋转在世界坐标系里是一直变化的; 但相对于芯模自身不发生改变, 所以定义的铺放路径和末端压辊位姿在 RMCS 中保持不变, 但相对于 FMCS 已经发生了位姿变化。RMCS 与 FMCS 的变换矩阵可通过芯模转角 θ_1 获得。

对于 RMCS 中的末端压辊位姿矩阵 ${}^m T_E$, 根据定义的位置子流形, 则有:

$${}^m p_w^T = {}^m T_m {}^m T_o^0 T_1^2 T_2^3 T_3^4 \cdot [|EW| \ 0 \ 0]^T \quad (2)$$

式中: ${}^m p_w^T$ 为机械臂腕点在 RMCS 坐标系中的位置向量; $[|EW| \ 0 \ 0]^T$ 为机械臂腕点在关节4坐标系中的向量表示。

令压辊到机械臂腕点 W 的长度为 l , 由于铺放头与机械臂关节7固定, 则腕点在末端位姿坐标系中的齐次坐标表示为 ${}^E l_w = [0 \ 0 \ -l]^T$, 则:

$${}^m p_w^T = {}^m T_E \cdot {}^E l_w \quad (3)$$

式中: ${}^m T_E$ 为铺放末端 RMCS 坐标系中的位姿矩阵。

再由式(2)和式(3)相等, 可以得到 ${}^m p_w$ 对应的位置子流形构型表达式。但由于冗余性, 无法得出各关节的解析解。为此, 需要对式(2)、式(3)做相应变换, 即:

$${}^1 T_2^3 T_3^4 \cdot [|EW| \ 0 \ 0]^T = {}^1 T_o^0 T_m^m T_m^m T_E \cdot {}^E l_w \quad (4)$$

式(4)等号左边包含位置子流形关节变量 $\theta_2 \sim \theta_4$, 等号右边包含 θ_1, d 两个自运动变量。因此, 可以将 $\theta_2, \theta_3, \theta_4$ 用 θ_1, d 表示; 对于 $\theta_2, \theta_3, \theta_4$ 的求解可采用几何法进行获取。

令腕点在机械臂基座坐标系 $x_1y_1z_1$ 下的坐标为 ${}^1 p_w = [{}^1 p_{wx} \ \ ^1 p_{wy} \ \ ^1 p_{wz}]$, 则有:

$${}^1 p_w^T = {}^1 T_o^0 T_m^m T_m^m T_E \cdot {}^E l_w \quad (5)$$

通过上式可得, ${}^1p_{Wx}, {}^1p_{Wy}, {}^1p_{Wz}$ 均为 θ_1 和 d 的表达式。

机器人的肩肘腕关节运动示意图如图 3 所示。

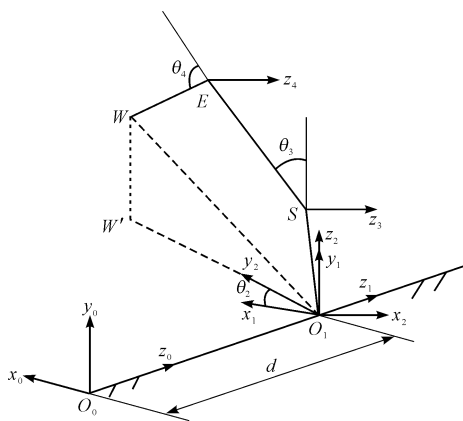


图 3 关节 2 旋转示意图
Fig. 3 Rotation of Joint 2

机器人肩肘腕关节共面, 即 O_1SEW 共面, 将腕点 W 投影到 x_2y_2 平面交于 W' , 则 O_1W' 与 y_2 轴重合, θ_2 即为 y_2 与 x_1 轴的夹角:

$$\theta_2 = \arctan({}^1p_{Wz} / {}^1p_{Wx}) \quad (6)$$

机器人基座旋转示意图如图 4 所示。

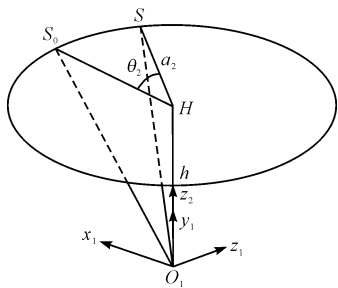


图 4 机械臂基座旋转示意图
Fig. 4 Rotation of manipulator base

初始状态下, 向量 $\mathbf{l}_{O_1S_0} = [a_2 \quad h \quad 0]^T$, a_2, h 均为机械臂已知的结构参数, 当关节 2 旋转 θ_2 角度后, 向量 $\mathbf{l}_{O_1S} = [a_2 \cos \theta_2 \quad h \quad a_2 \sin \theta_2]^T$ 。图 3 中向量 $\mathbf{l}_{O_1W} = [{}^1p_{Wx} \quad {}^1p_{Wy} \quad {}^1p_{Wz}]^T$, $\mathbf{l}_{SW} = \mathbf{l}_{O_1W} - \mathbf{l}_{O_1S}$, 可得:

$$\theta_3 = \arccos({}^0z_2 \cdot \mathbf{l}_{SW} / |\mathbf{l}_{SW}|) - \angle ESW \quad (7)$$

其中: ${}^0z_2 = [0 \quad 1 \quad 0]^T$, $\angle ESW = \arccos((|SE|^2 + |SW|^2 - |EW|^2) / (2|SE||SW|))$ 。

根据图 3 所示, 同样可求得 θ_4 如下:

$$\theta_4 = \pi - \angle SEW \quad (8)$$

其中: $\angle SEW = \arccos((|SE|^2 + |EW|^2 - |SW|^2) / (2|SE||EW|))$ 。

由上述求解可知, $\theta_2, \theta_3, \theta_4$ 均可以用 θ_1 和 d 表示, 从而得 $\theta_p = [\theta_1 \quad d \quad \theta_2 \quad \theta_3 \quad \theta_4]^T$ 的参数方程, 可抽象表示为 $H(\theta_p, \theta_1, d) = 0$, 即为位置子流形的参数

方程形式。

理论上, 根据机械臂是否翻肩和左右手臂形, 可以得到位置子流形的四个曲面。考虑实际铺放过程中机械臂工作的连续性, 其构型不可能在不同的位置子流形中跳转。因此, 上述求解的位置子流形只代表机械臂正常工作时的构型, 而对其他三种构型对应的位置子流形, 笔者不再详细论述。

2.2 姿态子流形求解

经过位置关节的运动, 其末端姿态已经改变, 末端姿态和关节 7 姿态一致。因此, 通过 $\theta_5, \theta_6, \theta_7$ 三个关节的依次运动将关节 7 恢复到给定目标姿态即可完成末端压辊姿态调整。

末端姿态调整过程如图 5 所示。

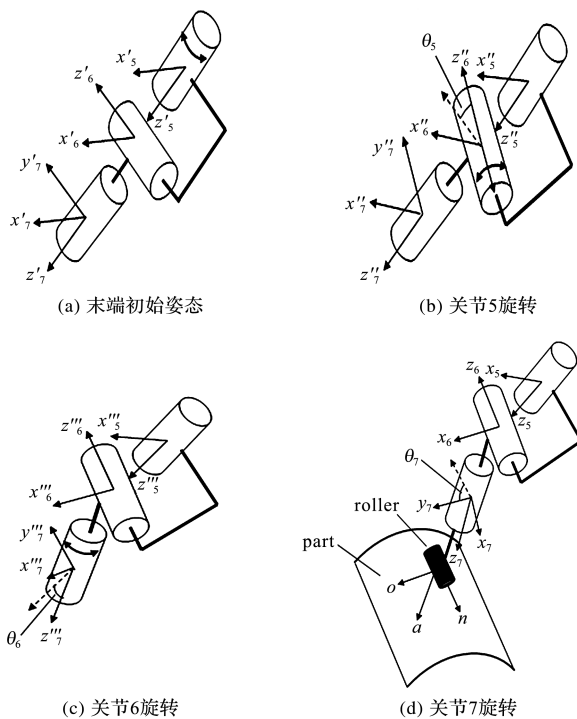


图 5 末端姿态关节依次运动过程

Fig. 5 Sequential motion process of end orientation joints

图 5(a) 图是经过位置关节运动后的关节 5 至 7 姿态示意图, 依次运动过程为关节 5 旋转 θ_5 和关节 6 旋转 θ_6 后, 使得 z_7 轴恢复到目标值; 再通过关节 7 运动旋转 θ_7 后, 使得末端坐标系 y 轴恢复到目标值。因为在进行姿态调节时, 腕点位置保持不变, 所以保证了最终末端位置的正确性。

根据关节 5 坐标系在关节 4 坐标系中的初始姿态, $z'_5 = {}^mT'_4 \cdot [0 \quad 1 \quad 0]^T$, $z'_6 = {}^mT'_4 \cdot [0 \quad 0 \quad 1]^T$, 其中, ${}^mT'_4$ 是关节 4 坐标系与芯模旋转坐标系之间的姿态变化矩阵, $[0 \quad 1 \quad 0]^T$ 是初始状态下 z_5 轴在关节 4 坐标下的向量表示, $[0 \quad 0 \quad 1]^T$ 是初始状态下 z_6 轴

在关节4坐标下的向量表示。

根据上述姿态变换过程,可得如下矢量代数表达式:

$$\theta_5 = \arccos(z'_6 \cdot z''_6) \quad (9)$$

$$\theta_6 = \arccos(z''_7 \cdot z'''_7) \quad (10)$$

$$\theta_7 = \arccos(y'''_7 \cdot y_7) \quad (11)$$

在关节依次运动过程中,可得下式:

$$\begin{cases} z'_7 = z''_7 = z'_5 \\ z'''_7 = z_7 = a \\ z''_6 = (z''_7 \times z'''_7) / \sin(\arccos(z''_7 \cdot z'''_7)) \\ y'''_7 = z'''_6 = z''_6 \end{cases} \quad (12)$$

其中,关节5旋转时可以顺时针或逆时针,即 z''_6 可以有 \pm 两种指向,表示是否翻腕。

在实际铺放应用中,机械臂不可翻腕,因此,笔者不再讨论翻腕对应的姿态子流形。

3 自运动流形仿真

此处,笔者以末端压辊位姿为例,给出其对应的自运动流形仿真。

该位姿矩阵是根据系统正解获得的齐次变换矩阵,其中, $\theta_1 = 0^\circ, d = 1\,500\text{ mm}, \theta_2 = 90^\circ, \theta_3 = 80^\circ, \theta_4 = -15^\circ, \theta_5 = 18^\circ, \theta_6 = 20^\circ, \theta_7 = 20^\circ$ 。

齐次变换矩阵为:

$${}^m T_E =$$

$$\begin{bmatrix} 0.721\,09 & -0.035\,602 & -0.691\,93 & 460.24 \\ -0.690\,86 & -0.112\,5 & -0.714\,18 & 845.36 \\ -0.052\,413 & 0.993\,01 & -0.105\,72 & 1\,500.00 \\ 0 & 0 & 0 & 1.000\,0 \end{bmatrix}$$

该位姿为仿真系统中机器人铺放时某一时刻对应的姿态。其中,左上角 3×3 矩阵表示末端压辊在芯模旋转坐标系 $x_m, y_m, z_m - O_m$ 中的姿态,右上角 3×1 矩阵表示压辊在芯模旋转坐标系的位置坐标。

其他参数分别为 $h = 675\text{ mm}, a_2 = 350\text{ mm}, X_f = 2\,500\text{ mm}, Y_f = 1\,000\text{ mm}, |SE| = 2\,500\text{ mm}, |EW| = 1\,200\text{ mm}$;并假定芯模和机械臂的移动方向均保持不变,即芯模保持逆时针旋转,机械臂远离零位移动,这与实际铺放过程相符。

θ_1 和 d 作为自运动变量,根据上述求解过程可得到其位置子流形仿真结果,如图6所示。

姿态子流形仿真结果如图7所示。

由于该冗余系统的自运动流形存在于八维关节构型中,无法直观表示。因此,需要将其分别映射为 $\theta_2, \theta_3, \theta_4$ 张成的空间位置子流形和 $\theta_5, \theta_6, \theta_7$ 张成的空间

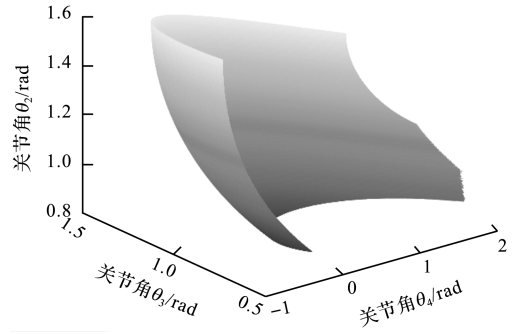


图6 位置子流形仿真

Fig. 6 Simulation of position sub-manifold

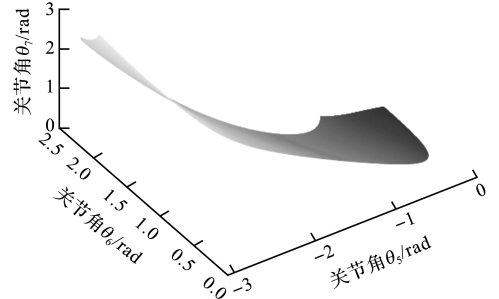


图7 姿态子流形仿真

Fig. 7 Simulation of orientation sub-manifold

姿态子流形来表示。

从仿真结果可以看出:该八自由度铺放机器人对应的自运动流形为空间中的部分曲面,而非完整的封闭曲面,这是因为KUKA机器人各关节角都有一定的变化范围,并非理想的 $(\pi, \pi]$ 取值范围。

这也和假定的芯模单一旋转方向以及机械臂单一移动方向因素相关。

笔者任取若干组自运动变量值,得到机械臂的关节角度值,并通过正向运动学得到末端位姿矩阵均与给定位姿相符,从而验证了自运动流形的正确性。

具体验证过程此处不再详述。

4 逆解全局优化及仿真验证

自运动流形给出了铺放路径上每个离散路径点对应的无穷多个逆解,逆解全局优化旨在建立某种优化准则,从自运动流形无数逆解中寻找最佳的逆解,从而用于控制机械臂完成铺放工作。

笔者从铺放路径全局出发,建立目标优化函数如下式所示:

$$H(\theta_1, d) = \sum_{\delta = \theta_2, \dots, \theta_7} \lambda_{\delta} \left(\frac{\sum_i \left(\frac{\partial^2 \delta_i}{\partial S_i^2} \right)^2}{\sum_i \left(\frac{\partial^2 \delta_i^0}{\partial S_i^2} \right)^2} + \frac{\sum_i (\delta_{i+1} - \delta_i)^2}{\sum_i (\delta_{i+1}^0 - \delta_i^0)^2} \right) \quad (13)$$

式中： S 为铺放路径； δ_i 为铺放路径上第 i 个离散路径点对应的关节 δ 角度优化值； δ_i^0 为铺放路径上第 i 个离散路径点对应的关节 δ 角度初始值； λ_δ 为各关节的优化平衡系数。

该优化准则针对机械臂每个旋转关节，均包含两项之和。其中，第一项是在全局铺放路径上求每个关节变化的两次连续可微曲线，从而使每个关节曲线的曲率变化之和最小，保证机械臂整体运动的平滑性。第二项使得在铺放全局过程中各个关节变化量之和最小，从而降低机械臂整体运动的幅度^[23]。

此处以长度约 2 450 mm 的飞机尾椎模型为铺放实验对象，如图 8 所示。

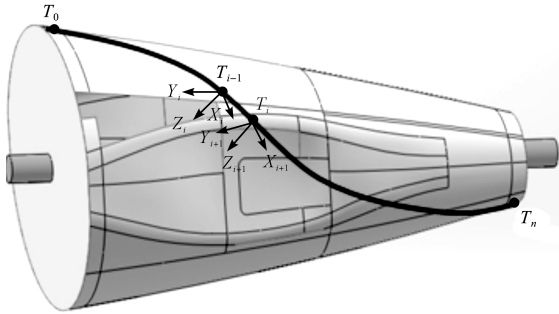


图 8 飞机尾椎模型及铺放路径

Fig. 8 Model of aircraft tail and one laying path

笔者以测地线规划一条铺放路径，长度约 3 500 mm，初始位姿点为 T_0 ，终点位姿为 T_n ， T_i 为铺放路径上第 i 个离散位姿点，对整条铺放路径采用上述自运动流形求解和优化准则进行优化。

芯模转角随铺放路径优化曲线如图 9 所示。

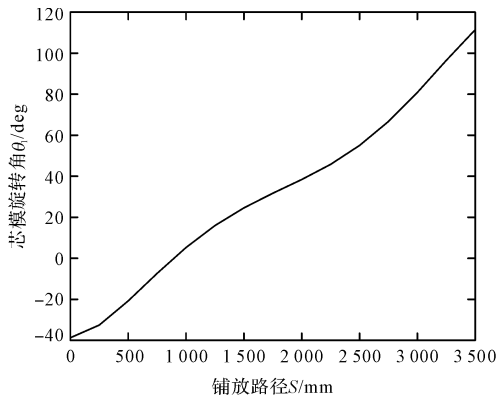


图 9 芯模转角随铺放路径优化曲线

Fig. 9 Optimal curve of mold rotating angle with growing laying path

机械臂位移随铺放路径优化曲线如图 10 所示。

机械臂关节角随铺放路径优化曲线如图 11 所示。

从仿真图 9 可得：芯模初始旋转角度约为 -40° ，说明芯模初始顺时针旋转了约 40° ，使机械臂具有一个合理的初始构型。在后续铺放过程中，芯模一直保

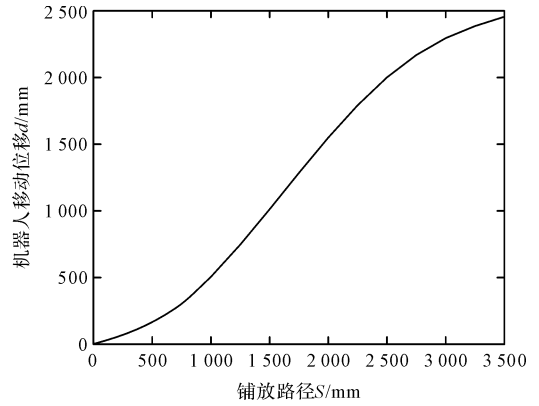


图 10 机械臂位移随铺放路径优化曲线

Fig. 10 Optimal curve of manipulator displacement with growing laying path

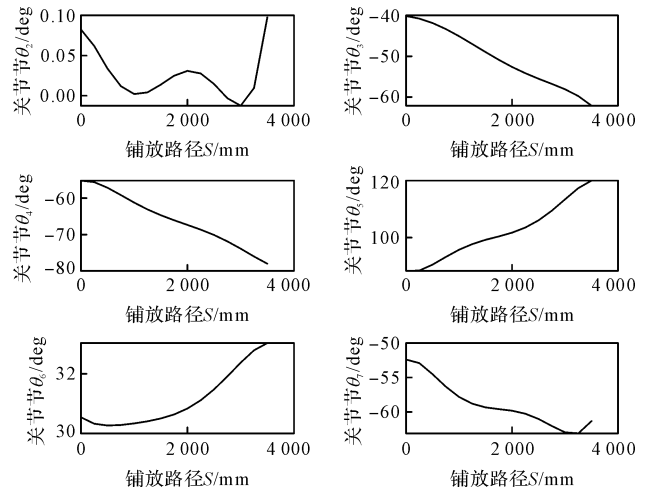


图 11 机械臂关节角随铺放路径优化曲线

Fig. 11 Optimal curves of manipulator joint angle with growing laying path

持逆时针旋转。

同时，图 10 中机械臂的移动位移量也是一直增大，说明其移动方向不变。 θ_2 基本保持 0° 不变，表示机械臂基座关节不发生旋转，通过直线移动来满足芯模坐标系下铺放位姿点的 Z 方向坐标值。

图 11 中，关节 2 变化量很小，说明机械臂基座关节基本不发生旋转，这与图 9 和图 10 的结果相符。

优化目标函数中，各关节平衡系数取值根据其运动学和动力学特性选取，如表 1 所示。

表 1 优化平衡系数取值

Table 1 Value of optimal balance coefficient

系数	取值
λ_{θ_2}	2
λ_{θ_3}	2
λ_{θ_4}	2
λ_{θ_5}	1
λ_{θ_6}	1
λ_{θ_7}	0.5

由于机械臂前面3关节的转动会导致铺放末端大幅移动,对铺放质量影响很大。因此,前面三个关节角应作为重点优化项,其优化系数取值较大。后面三个腕关节用于姿态调整,对铺放末端的影响较小,尤其关节7甚至允许在规划的角度上进行小范围调整,均不会影响铺放质量。因此,优化系数取值较小。

针对图8中的同一铺放路径,其铺放路径离散点和末端位姿设置均相同,不同优化算法将导致关节角的变化过程也不同。

笔者将自运动流形及逆解优化算法,和文献[17]的多目标优化算法进行对比。机械臂各关节角变化之和与所有关节角变化总和的对比结果,如图12所示。

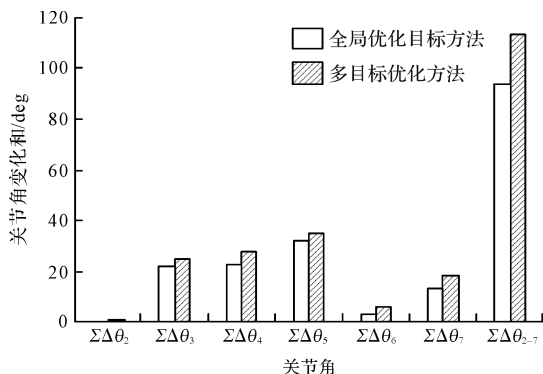


图12 机械臂关节角变化对比图

Fig. 12 Contrast diagram of robotic joints variation

由图12可得:笔者建立的目标优化函数使得机械臂(在铺放过程中)各关节运动变化量以及所有关节运动总变化量都是更小的,从而可以得到更好的铺放质量。其中,该方法对应的关节角变化总量为 100.542° ,而多目标优化方法对应的关节角变化总量为 113.282° ,因此,关节运动总量减少的百分比为 $(113.282-100.542)/113.282 = 11.25\%$ 。

5 结束语

笔者采用几何法求解了八自由度铺丝机器人的位置子流形和姿态子流形,对给定的末端位姿进行了流形仿真,并验证了其正确性;提出了一种全局优化目标函数,对飞机尾椎模型的一条铺放路径进行了仿真优化,得到了自运动变量和机器人各关节角在铺放路径上的优化曲线,从而可为机器人运动控制提供理论基础。

研究表明:

1)采用基于自运动流形的全局优化目标函数算法,能够有效求解八自由度冗余铺放机器人的自运动流形;全局目标优化函数能够基于自运动流形寻找最优解;

2)相较于文献[17]的多目标优化算法,针对相同的铺放路径,逆解全局优化算法对应的关节运动总量可减少 11.25% ,从而可实现更好的铺放质量;

3)全局优化目标函数算法同样可适用于其他位姿解耦的冗余机器人的逆运动学问题求解。

在下一阶段,笔者将基于仿真优化的结果,将自运动变量和各关节优化曲线进行离散化,并发送给机器人执行,从而进行机器人铺放效率方面的对比和研究。

参考文献(References):

- [1] 王显峰,段少华,唐珊珊,等. 复合材料自动铺放技术在航空航天领域的研究进展[J]. 航空制造技术, 2022, 65(16):64-77.
WANG Xian-feng, DUAN Shao-hua, TANG Shan-shan, et al. Progress of composite automated placement technology in aviation field [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(16):64-77.
- [2] CLANCY G, PEETERS D, O'HIGGINS R M, et al. In-line variable spreading of carbon fiber/thermos-plastic prepreg tapes for application in automatic tape placement [J]. Materials & Design, 2020, 194:108967.
- [3] GONCALVES V M, FRAISSE P, CROSNIER A, et al. Parsimonious kinematic control of highly redundant robots [J]. IEEE. Robotics and Automation Letters, 2016, 1(1):65-72.
- [4] CHEN W Z, CHEN Y, LI B, et al. Design of redundant robot painting system for long non-regular duct[J]. Industrial Robot, 2016, 43(1):58-64.
- [5] 李亚昕,王国磊,张剑辉,等. 基于碰撞反馈的冗余机器人避障规划算法[J]. 清华大学学报:自然科学版, 2022, 62(3):408-415.
LI Ya-xin, WANG Guo-lei, ZHANG Jian-hui, et al. Obstacle avoidance algorithm for redundant robots based on collision feedback [J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2022; 62(3):408-415.
- [6] 申浩宇,吴洪涛,陈柏,等. 基于主从任务转化的冗余度机器人避障算法[J]. 机器人, 2014, 36(4):425-429.
SHEN Hao-Yu, WU Hong-Tao, CHEN Bai, et al. Obstacle avoidance algorithm for redundant robots based on transition between the primary and secondary tasks [J]. Robot, 2014, 36(4):425-429.
- [7] YANG Lei, ZHANG George. An Analytic Solution Study for a 7-DOF Redundant Robot Manipulator [C]//2018 IEEE. 8th Annual International Conference on CYBER Technology in Automation, Control and Intelligent System (CYBER), Tianjin, 2018:1057-1061.
- [8] YANG Jun-juan, WANG Xiu-lian, CUI Long, et al. Inverse Kinematics of Redundant Manipulator Used in Tele-operation

- [C]//2018 IEEE. 8th Annual International Conference on Information and Automation, Lijiang, 2015:1690-1695.
- [9] 刘世平,曹俊峰,孙涛,等. 基于 BP 神经网络的冗余机械臂逆运动学分析[J]. 中国机械工程, 2019, 30(24): 2974-2977.
LIU Shi-ping, CAO Jun-feng, SUN Tao, et al. Inverse kinematics analysis of redundant manipulator based on BP neural network[J]. China Mechanical Engineering, 2019, 30(24): 2974-2977.
- [10] 刘雪梅,冯焱,杨振,等. 冗余机器人喷涂系统改进人工鱼群逆运动学求解算法[J], 中国机械工程 2022, 33(11):1317-1323.
LIU Xue-mei, FENG Yan, YANG Zhen, et al. IAFSA for solving inverse kinematics of redundant robotic spraying system[J]. China Mechanical Engineering, 2022, 33(11): 1317-1323.
- [11] 段晋军,甘亚辉,戴先中,等. 基于可操作度评价的冗余机器人逆解求解方法[J]. 华中科技大学学报:自然科学版, 2015, 43(S1): 45-48.
DUAN Jin-jun, GAN Ya-hui, DAI Xian-zhong, et al. Method of inverse kinematics solution for a redundant manipulator based on manipulability [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2015, 43(S1): 45-48.
- [12] 牟宗高. 面向狭小空间作业的超冗余机器人轨迹规划及控制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学深圳研究生院, 2017.
MOU Zong-gao. Research on Trajectory Planning and Control of Hyper-Redundant Robots for Confined-space Operations [D]. Harbin: Shenzhen Graduate School, Harbin Institute of Technology, 2017.
- [13] MAHMOUD T, KANCHERLA K, MALREY L. Classification and characterization of inverse kinematics solutions for anthropomorphic manipulators [J]. Robotics and Autonomous Systems, 2010, 58(1): 115-120.
- [14] MOORE B, OZTOP. E. Redundancy Parameterization for Flexible Motion Control [C]//Proceedings of the ASME2010 IDETC/CIE, 2010:1309-1316.
- [15] PIERRE D, HELENE C, EMMANUEL D. Tool path smoothing of a redundant machine: application to automated fiber placement[J]. Computer-Aided Design, 2011, 43(2): 122-132.
- [16] JIUCHUN G, ANATOL P, STEPHANE C. Optimization of the robot and positioner motion in a redundant fiber placement work cell[J]. Mechanism and Machine Theory, 2017, 114(8): 170-189.
- [17] 徐朋,赵东标,程锦翔,等. 冗余机器人逆运动学解流形的多目标优化[J]. 机器人, 2016, 38(6): 704-710.
XU Peng, ZHAO Dong-biao, CHENG Jin-xiang, et al. Multi-objective optimization for inverse kinematics solution manifolds of redundant robots [J]. Robot, 2016, 38(6): 704-710.
- [18] 徐朋,赵东标,应明峰,等. 冗余铺丝机械手自运动流形分析及优化[J]. 航空学报, 2017, 38(1): 318-327.
XU Peng, ZHAO Dong-biao, YING Ming-feng, et al. Analysis and optimization for self-motion manifolds of redundant fiber placement manipulator [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2017, 38(1): 318-327.
- [19] 赵建文,杜志江,孙立宁. 7 自由度冗余手臂的自运动流形[J]. 机械工程学报, 2007, 43(9): 132-137.
ZHAO Jian-wen, DU Zhi-jiang, SUN Li-ning. Self-motion manifolds of a 7-DOF redundant robot arm [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2009, 43(9): 132-137.
- [20] 葛新锋,赵东标. 7 自由度自动铺丝机器人参数化的自运动流形[J]. 机械工程学报, 2012, 48(13): 27-31.
GE Xin-feng, ZHAO Dong-biao. Parameterized self-motion manifold of 7-DOF automatic fiber placement robotic manipulator [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(13): 27-31.
- [21] 栗伟周,葛新锋. 自动铺丝机器人的运动学性能指标分析研究[J]. 机电工程, 2018, 35(8): 892-897.
LI Wei-zhou, GE Xin-feng. Kinematics performance index of automated fiber placement robotic manipulator [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2018, 35(8): 892-897.
- [22] 郭娟,林勇. 自动铺丝机器人运动学逆解的求解算法[J]. 机电工程, 2015, 32(4): 575-578.
GUO Juan, LIN Yong. Inverse kinematics algorithm for the automated fiber placement robotic manipulator [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2015, 32(4): 575-578.
- [23] 周振,王冬青,许崇立. 3DoF 模块化机械臂轨迹跟踪策略[J]. 传感器与微系统, 2021, 40(7): 35-38, 47.
ZHOU Zhen, WANG Dong-qing, XU Chong-li. 3DoF modular robotic arm trajectory tracking strategy [J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2021, 40(7): 35-38, 47.

本文引用格式:

李奎,徐孝彬,王婷婷,等. 冗余铺放机器人的自运动流形及逆解优化研究[J]. 机电工程, 2024, 41(3): 551-558.

LI Kui, XU Xiaobin, WANG Tingting, et al. Self-motion manifolds and inverse kinematic optimization of redundant fiber placement robot [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2024, 41(3): 551-558.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>