

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2018.08.021

自动铺丝机器人的运行学性能指标分析研究^{*}

栗伟周,葛新锋^{*}

(许昌学院 工程技术中心,河南 许昌 461000)

摘要:针对 7 自由度纤维丝束自动铺放机器人运动学性能指标的衡量问题,引入了活动标架和外微分。根据活动标架来推导出串联机器人的运动学方程,根据外微分定义了机器人的体积元函数,提出了利用外微分和活动标架结合定义来体积元函数,并作为衡量冗余自由度机器人运动学操作度的性能指标;然后把 7 自由度纤维丝束自动铺放机器人的相关 D-H 参数代入用活动标架推导的运动学方程和用外微分定义的体积元函数,求出了 7 自由度纤维丝束自动铺放机器人的体积元函数;对比了体积元函数和 Yoshikawa 提出的操作度函数,发现了体积元函数和操作度函数具有相同的变化规律。研究结果表明:采用体积元作为衡量 7 自由度纤维丝束自动铺放机器人运动学操作性能指标是有效的。

关键词:活动标架;外微分;操作度;性能指标;体积元

中图分类号:TP241.2

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2018)08-0893-06

Kinematics performance index of automated fiber placement robotic manipulator

LI Wei-zhou, GE Xin-feng

(Centre of Engineering Technology, Xuchang University, Xuchang 461000, China)

Abstract: Aiming at measuring the automated fiber placement robotic manipulator's kinematics performance index, the moving frame system and exterior differential were introduced. The kinematics equations of robotic manipulator was derived according to moving frame system method and the volume element function was defined according to exterior differential, the volume element function of robotic manipulator was taken as kinematics performance index measuring redundant robotic manipulator's kinematics manipulability. Then the automatic fiber placement robotic manipulator was taken as an example, and the volume element function of the automatic fiber placement robotic manipulator was obtained. The volume element function which derived from volume element that defined by the moving frame system and the exterior differential of differential geometry and Yoshikawa's manipulability function was the same comparing Yoshikawa's manipulability function. The results indicate that the volume element as a kinematics operational performance index is feasible.

Key words: moving frame system; exterior differential; manipulability; kinematics performance index; volume element

0 引 言

复合材料纤维丝束铺放技术一般都是由冗余自由度机器人来完成,所以冗余自由度纤维丝束铺放机器人的发展得益于铺放成型技术的发展^[1]。20 世纪 90

年代,美国辛辛那提公司^[2]开发了世界上第一台纤维丝束铺放机器人;此后,美国的 EI 公司^[3]研制出一款多铺丝头高速冗余铺丝设备,极大提高了铺丝过程的工作效率;法国科里奥利公司研发的冗余铺丝机械手硬件功能齐全,并且配有 CAD/CAM 软件 CATFiber,非

收稿日期:2018-03-26

基金项目:河南省科技攻关项目(172102210094)

作者简介:栗伟周(1988-),男,河南安阳人,工学硕士,助教,主要从事机器人控制技术方面的研究。E-mail:531510626@qq.com

通信联系人:葛新锋,男,副教授。E-mail:gexinfeng11@126.com

常适合对形状复杂零件的铺放。与此同时,国内南京航空航天大学^[4]、哈尔滨工业大学等^[5]高校开始对冗余纤维束束铺放机器人进行了系统的理论研究和试验分析,取得了阶段性成果。

在对纤维束束铺放机器人的研究中,冗余自由度机器人以其高度的灵活性,良好的避奇异和壁障能力受到了众多研究者的青睐^[6-8]。

为了采用量化的性能指标来评价冗余自由度机器人的运动能力,灵活性和避障避奇异能力成为了研究的热点。YOSHIKAWA^[9]用可操作度来衡量冗余自由度机器人的灵活性,可操作度越大,机器人越灵活;SALISBURY^[10]用条件数来衡量机器人的操作能力;ANGLE^[11]改进了条件数;KLEIN^[12]用最小奇异值作为衡量冗余自由度机器人的性能指标,并将其运用到冗余自由度机器人设计与控制中;郭希娟^[13]在Gosselin^[14]提出的全局性能指标的基础给出了二阶影响系数的全域性能指标。

但以上几个操作性能指标都是基于 Jacobian 矩阵,依赖于 $R^6 \cong se(3)$ 上的欧氏度量,但欧氏度量依赖于坐标系,不同坐标系下 Jacobian 矩阵的最小奇异值不同,因此用 Jacobian 矩阵最小奇异值来衡量机器人的操作性能是不行的。文献[15]中提出了体积元作为衡量机器人运动学操作性能的性能指标,但是对于冗余自由度机器人的运动学性能指标没有给出定义。

本文将在文献[15]的基础上,定义体积元,把体积元函数作为衡量机器人运动学可操作性度量的指

标,并以七自由度自动铺丝机器人为例,求出体积元函数。

1 机器人活动标架的递推公式和外微分

1.1 机器人的活动标架

机器人连杆 i 的活动标架建立在连杆 $i-1$ 上,这样机器人末端手抓 n 的活动标架即机器人连杆 $n-1$ 上,通过递推即可推出连杆 $n-1$ 的活动标架^[16]。

在串联机器人相邻关节上标注活动标架,相邻关节 $i-1, i, i+1$ 和连杆 $i-1, i$ 上的活动标架标注如图1所示。

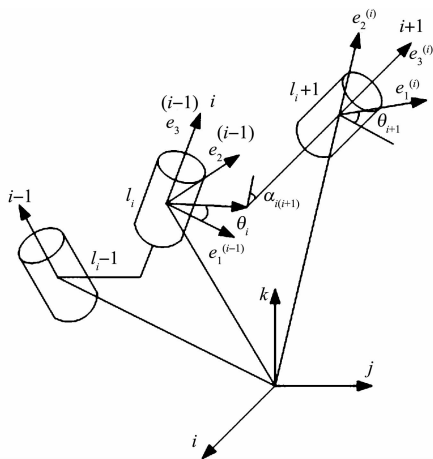


图1 连杆上的活动标架系

l_i —连杆长; a_i —偏距; $\alpha_{i(i+1)}$ —关节 i 和 $i+1$ 之间的扭角

转动关节的活动标架:

$$\begin{cases} \mathbf{r}_i = \mathbf{r}_{i-1} + [l_i \cos \theta_i + a_{i+1} \sin \alpha_{i(i+1)} \sin \theta_i] \mathbf{e}_1^{(i-1)} + [l_i \sin \theta_i - a_{i+1} \sin \alpha_{i(i+1)} \cos \theta_i] \mathbf{e}_2^{(i-1)} + a_{i+1} \cos \alpha_{i(i+1)} \mathbf{e}_3^{(i-1)} \\ \mathbf{e}_1^{(i)} = \cos \theta_i \mathbf{e}_1^{(i-1)} + \sin \theta_i \mathbf{e}_2^{(i-1)} \\ \mathbf{e}_2^{(i)} = -\cos \alpha_{i(i+1)} \sin \theta_i \mathbf{e}_1^{(i-1)} + \cos \alpha_{i(i+1)} \cos \theta_i \mathbf{e}_2^{(i-1)} + \sin \alpha_{i(i+1)} \mathbf{e}_3^{(i-1)} \\ \mathbf{e}_3^{(i)} = \sin \alpha_{i(i+1)} \sin \theta_i \mathbf{e}_1^{(i-1)} - \sin \alpha_{i(i+1)} \cos \theta_i \mathbf{e}_2^{(i-1)} + \cos \alpha_{i(i+1)} \mathbf{e}_3^{(i-1)} \end{cases} \quad (1)$$

移动关节的活动标架:

$$\begin{cases} \mathbf{r}_i = \mathbf{r}_{i-1} + l_i \mathbf{e}_1^{(i-1)} - a_{i+1} \sin \alpha_{i(i+1)} \mathbf{e}_2^{(i-1)} + (d_i + a_{i+1} \cos \alpha_{i(i+1)}) \mathbf{e}_3^{(i-1)} \\ \mathbf{e}_1^{(i)} = \mathbf{e}_1^{(i-1)} \\ \mathbf{e}_2^{(i)} = \cos \alpha_{i(i+1)} \mathbf{e}_2^{(i-1)} + \sin \alpha_{i(i+1)} \mathbf{e}_3^{(i-1)} \\ \mathbf{e}_3^{(i)} = -\sin \alpha_{i(i+1)} \mathbf{e}_2^{(i-1)} + \cos \alpha_{i(i+1)} \mathbf{e}_3^{(i-1)} \end{cases} \quad (2)$$

式中: θ_i, d_i —转动关节和移动关节的关节变量; $\mathbf{e}_1^{(i)}, \mathbf{e}_2^{(i-1)}, \mathbf{e}_3^{(i)}$ —连杆 i 上活动标架的姿态矢量; $\mathbf{r}_i$ —连杆 i 上活动标架原点的位置矢量。

这样连杆 i 的位置和姿态就可以由活动标架完全确定。表示成矩阵形式为:

$$\{\mathbf{r}_i; \mathbf{e}_1^{(i)}, \mathbf{e}_2^{(i-1)}, \mathbf{e}_3^{(i)}\} = \{\mathbf{r}_{i-1}; \mathbf{e}_1^{(i-1)}, \mathbf{e}_3^{(i-1)}, \mathbf{e}_3^{(i-1)}\} {}^{i-1}T_i \quad (3)$$

对于转动关节:

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\cos\alpha_{i(i+1)}\sin\theta_i & \sin\alpha_{i(i+1)}\sin\theta_i & l_i\cos\theta_i + a_{i+1}\sin\alpha_{i(i+1)}\sin\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\alpha_{i(i+1)}\cos\theta_i & -\sin\alpha_{i(i+1)}\cos\theta_i & l_i\sin\theta_i - a_{i+1}\sin\alpha_{i(i+1)}\cos\theta_i \\ 0 & \sin\alpha_{i(i+1)} & \cos\alpha_{i(i+1)} & a_{i+1}\cos\alpha_{i(i+1)} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

对于移动关节：

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & l_i \\ 0 & \cos\alpha_{i(i+1)} & -\sin\alpha_{i(i+1)} & -a_{i+1}\sin\alpha_{i(i+1)} \\ 0 & \sin\alpha_{i(i+1)} & \cos\alpha_{i(i+1)} & d_i + a_{i+1}\cos\alpha_{i(i+1)} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

则机器人末端执行器的位姿为：

$$\{\boldsymbol{e}_1, \boldsymbol{e}_2, \boldsymbol{e}_3; \boldsymbol{r}\} = {}^0T_1(\theta_1){}^1T_2(\theta_2)\cdots{}^{n-1}T_n(\theta_n) \quad (6)$$

1.2 外微分形式

设 n 维欧氏空间 R^n 中的坐标 $(x^1, x^2, \cdots, x^n)$ ，以 $(dx^1, dx^2, \cdots, dx^n)$ 为基底的实向量空间为 V ，可以做出向量空间 $G(V)$ 。其中， $V^p(p = 1, \cdots, n)$ 中的元素可以表示为：

$$\sum_{1 \leq i_1 < \cdots < i_p \leq n} a_{i_1 \cdots i_p}(x^1, x^2, \cdots, x^n) dx^{i_1} \wedge \cdots \wedge dx^{i_p} \quad (7)$$

式(7)称为 R^n 上的 p 次外微分形式。特别地， $V^1 =$

V 中的元素 $\omega = \sum_{i=1}^n a_i(x^1, x^2, \cdots, x^n) dx^i$ 称为一次外微分形式。

活动标架的集合构成了机器人的工作空间曲面，该曲面反映了机器人的运动学性质。因此，本研究用外微分和活动标架在该曲面上定义反映运动学操作性能的不变量。

2 体积元

机器人的工作空间反映了末端手抓的运动密度，可用体积元描述，对体积元积分就可求得工作空间。在末端手抓上建立活动标架，该活动标架的运动集合就是机器人的工作空间。末端手抓上活动标架的相对分量为 $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_{23}, \omega_{31}, \omega_{12}$ ，找出活动标架的 6 个相对分量中的极大线性无关组，并作外积，就构成了体积元 dV ：

$$dV = \omega_1 \wedge \omega_2 \wedge \omega_3 \wedge \omega_{23} \wedge \omega_{31} \wedge \omega_{12}$$

平移体积元 dT 为：

$$dT = \omega_1 \wedge \omega_2 \wedge \omega_3$$

旋转体积元 dR 为：

$$dR = \omega_{23} \wedge \omega_{31} \wedge \omega_{12}$$

体积元反映了机器人末端手抓的位置对应平移体积，末端手抓的姿态对应旋转体积。

3 七自由度自动铺丝机器人的体积元

3.1 七自由度自动铺丝机器人的结构及参数

七自由度纤维丝束自动铺放机器人由六自由度机器人和芯模构成。在计算工作空间时进行等效变换：芯模固定不动，芯模上坐标系与基坐标系重合，基座与芯模用虚拟旋转关节相连，这样该七自由度机器人就由 4 个转动关节、3 个移动关节构成。七自由度纤维丝束自动铺放机器人结构如图 2 所示^[17]。

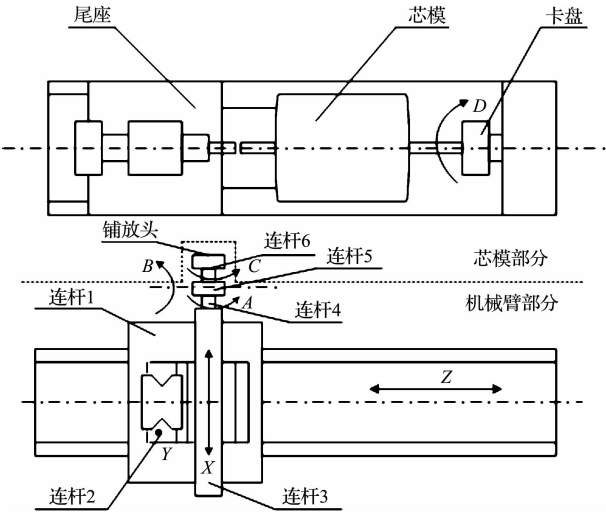


图 2 纤维丝束自动铺放机器人结构图

腕部 3 个转动关节交与一点，其等效拓扑结构如图 3 所示。

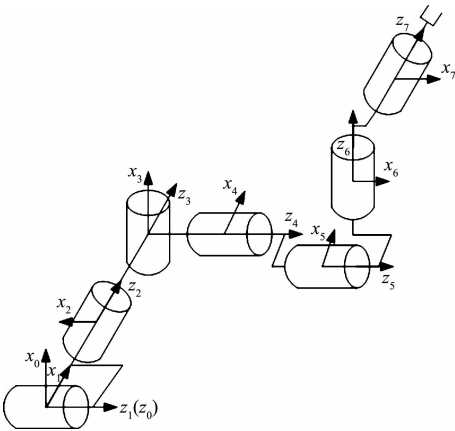


图 3 纤维丝束自动铺放机器人拓扑结构图

按 D-H 参数建立坐标系，标注七自由度纤维丝束自动铺放机器人参数，其参数如表 1 所示。

表1 纤维丝束自动铺放机器人参数表

连杆 <i>i</i>	关节偏移 <i>a</i> _{<i>i</i>-1} /mm	关节扭角 <i>α</i> _{<i>i</i>-1} / (°)	连杆长度 <i>d</i> _{<i>i</i>} /mm	关节转角 <i>θ</i> _{<i>i</i>} / (°)	关节变化范围
1	<i>a</i> ₀	0	0	<i>θ</i> ₁	- 180 ~ 180
2	0	0	<i>d</i> ₁	0	- 150 ~ 150
3	0	90	<i>d</i> ₂	- 90	- 110 ~ 110
4	<i>a</i> ₃	90	<i>d</i> ₃	0	- 100 ~ 100
5	0	0	<i>c</i>	<i>θ</i> ₅	- 90 ~ 90
6	0	90	0	<i>θ</i> ₆	- 120 ~ 120
7	0	- 90	0	<i>θ</i> ₇	- 270 ~ 270

3.2 七自由度自动铺丝机器人的体积元

本研究把表1中七自由度自动铺丝机器人的连杆参数代入式(4,5),得出各个关节上活动标架的矩阵表示:

$${}^0T_1 = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & -\sin\theta_1 & 0 & a_0 \\ \sin\theta_1 & \cos\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$${}^1T_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$${}^2T_3 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -d_3 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$${}^3T_4 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_3 \\ 0 & 0 & -1 & -d_4 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$${}^4T_5 = \begin{bmatrix} \cos\theta_5 & -\sin\theta_5 & 0 & 0 \\ \sin\theta_5 & \cos\theta_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$${}^5T_6 = \begin{bmatrix} \cos\theta_6 & -\sin\theta_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ \sin\theta_6 & \cos\theta_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$${}^6T_7 = \begin{bmatrix} \cos\theta_7 & -\sin\theta_7 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta_7 & -\cos\theta_7 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

将以上矩阵相乘,就可得到末端手抓的基于活动标架的矩阵:

$$g = \begin{bmatrix} R & p \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} & g_{13} & g_{14} \\ g_{21} & g_{22} & g_{23} & g_{24} \\ g_{31} & g_{32} & g_{33} & g_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{8}$$

其中, $R = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} & g_{13} \\ g_{21} & g_{22} & g_{23} \\ g_{31} & g_{32} & g_{33} \end{bmatrix}, p = \begin{bmatrix} g_{14} \\ g_{24} \\ g_{34} \end{bmatrix}$

$$\begin{aligned} g_{11} &= \sin\theta_1\sin\theta_5\cos\theta_6\cos\theta_7 - \cos\theta_1\sin\theta_6\cos\theta_7 + \sin\theta_1\cos\theta_5\sin\theta_7 \\ g_{12} &= -\sin\theta_1\sin\theta_5\cos\theta_6\sin\theta_7 + \cos\theta_1\sin\theta_6\sin\theta_7 + \sin\theta_1\cos\theta_5\cos\theta_7 \\ g_{13} &= -\sin\theta_1\sin\theta_5\sin\theta_6 - \cos\theta_1\cos\theta_6 \\ g_{14} &= -(c + d_4)\cos\theta_1 + d_3\sin\theta_1 + a_0 \\ g_{21} &= -\cos\theta_1\sin\theta_5\cos\theta_6\cos\theta_7 - \sin\theta_1\sin\theta_6\cos\theta_7 - \cos\theta_1\cos\theta_5\sin\theta_7 \\ g_{22} &= \cos\theta_1\sin\theta_5\cos\theta_6\sin\theta_7 + \sin\theta_1\sin\theta_6\sin\theta_7 - \cos\theta_1\cos\theta_5\cos\theta_7 \\ g_{23} &= \cos\theta_1\sin\theta_5\sin\theta_6 - \sin\theta_1\cos\theta_6 \\ g_{24} &= -(c + d_4)\sin\theta_1 - d_3\cos\theta_1 \\ g_{31} &= -\cos\theta_5\cos\theta_6\cos\theta_7 + \sin\theta_5\sin\theta_7 \\ g_{32} &= \cos\theta_5\cos\theta_6\sin\theta_7 + \sin\theta_5\cos\theta_7 \\ g_{33} &= \cos\theta_5\sin\theta_6 \\ g_{34} &= -a_3 + d_2 \end{aligned}$$

则七自由度自动铺丝机器人末端执行器的广义速度为:

$$g^{-1}dg = \begin{bmatrix} R^{-1}dR & R^{-1}dp \\ 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Omega_1 & \Omega_2 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{9}$$

假设七自由度自动铺丝机器人末端执行器的物体速度为:

$$V = [\omega_1 \quad \omega_2 \quad \omega_3 \quad \omega_{23} \quad \omega_{31} \quad \omega_{12}]^T \tag{10}$$

则: $\Omega_1 = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_{12} & \omega_{31} \\ \omega_{12} & 0 & -\omega_{23} \\ -\omega_{31} & \omega_{23} & 0 \end{bmatrix}, \Omega_2 = \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \end{bmatrix}.$

把式(8)代入式(9),得到活动标架的六个线性无关的相对分量:

$$\begin{cases} \omega_1 = g_{11}dg_{14} + g_{21}dg_{24} + g_{31}dg_{34} \\ \omega_2 = g_{12}dg_{14} + g_{22}dg_{24} + g_{32}dg_{34} \\ \omega_3 = g_{13}dg_{14} + g_{23}dg_{24} + g_{33}dg_{34} \\ \omega_{23} = g_{13}dg_{12} + g_{23}dg_{22} + g_{33}dg_{32} \\ \omega_{12} = g_{12}dg_{11} + g_{22}dg_{21} + g_{32}dg_{31} \\ \omega_{31} = g_{11}dg_{13} + g_{21}dg_{21} + g_{31}dg_{33} \end{cases} \tag{11}$$

这些分量的外积构成了自动铺丝机器人的体积元 dV , 即:

$$dV = (g_{11}dg_{14} + g_{21}dg_{24} + g_{31}dg_{34}) \wedge (g_{12}dg_{14} + g_{22}dg_{24} + g_{23}dg_{34}) \wedge (g_{13}dg_{14} + g_{23}dg_{24} + g_{33}dg_{34}) \wedge (g_{13}dg_{12} + g_{23}dg_{22} + g_{33}dg_{32}) \wedge (g_{12}dg_{11} + g_{22}dg_{21} + g_{32}dg_{31}) \wedge (g_{11}dg_{13} + g_{21}dg_{21} + g_{31}dg_{33}) \quad (12)$$

对式(12) 进行积分, 即可得到体积元函数。

4 结果分析

YOSHIKAWA 提出了基于 Jacobian 矩阵的可操作度 w 作为衡量机器人操作性能的度量指标, 并且给出定义 $w = \sqrt{\det(JJ^T)}$, 得出 w 越大冗余机器人的总体灵活性越好的结论。在此后机器人的运动学性能的研究中, YOSHIKAWA 的定义得到了广泛的应用。七自由度纤维丝束自动铺放机器人的 Jacobian 矩阵为:

$$J = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} & J_{13} & J_{14} & 0 & 0 & 0 \\ J_{21} & J_{22} & J_{23} & J_{24} & 0 & 0 & 0 \\ J_{31} & J_{32} & J_{33} & J_{34} & 0 & 0 & 0 \\ J_{41} & 0 & 0 & 0 & J_{45} & J_{46} & 0 \\ J_{51} & 0 & 0 & 0 & J_{55} & J_{56} & 0 \\ J_{61} & 0 & 0 & 0 & J_{65} & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中:

$$\begin{aligned} J_{11} &= -d_3 \sin \theta_6 \cos \theta_7 + (c + d_4)(\sin \theta_5 \cos \theta_6 \cos \theta_7 + \cos \theta_5 \sin \theta_7) \\ J_{12} &= -\cos \theta_5 \cos \theta_6 \cos \theta_7 + \sin \theta_5 \sin \theta_7 \\ J_{13} &= \sin \theta_5 \cos \theta_6 \cos \theta_7 + \cos \theta_5 \sin \theta_7 \\ J_{14} &= J_{45} = \sin \theta_6 \cos \theta_7 \\ J_{21} &= d_3 \sin \theta_6 \sin \theta_7 + (c + d_4)(\sin \theta_5 \cos \theta_6 \sin \theta_7 + \cos \theta_5 \cos \theta_7) \\ J_{23} &= -\sin \theta_5 \cos \theta_6 \sin \theta_7 + \cos \theta_5 \cos \theta_7 \\ J_{24} &= J_{55} = -\sin \theta_6 \sin \theta_7 \\ J_{31} &= -d_3 \cos \theta_6 + (c + d_4) \sin \theta_5 \sin \theta_6 \\ J_{33} &= \sin \theta_5 \sin \theta_6 \\ J_{34} &= J_{65} = \cos \theta_6 \\ J_{41} &= -\cos \theta_5 \cos \theta_6 \cos \theta_7 + \sin \theta_5 \sin \theta_7 \\ J_{46} &= -\sin \theta_7 \\ J_{51} &= J_{22} = \cos \theta_5 \cos \theta_6 \sin \theta_7 + \sin \theta_5 \cos \theta_7 \\ J_{56} &= -\cos \theta_7 \\ J_{61} &= J_{32} = -\cos \theta_5 \sin \theta_6 \end{aligned}$$

由于求出的操作度函数和体积元函数都是变量比较多的函数, 但从形式上没办法比较它们的异同。因此, 本研究在所求出的操作度函数和体积元函数中, 分

别做出函数的变化曲线, 操作度函数的变化趋势如图 4 所示。

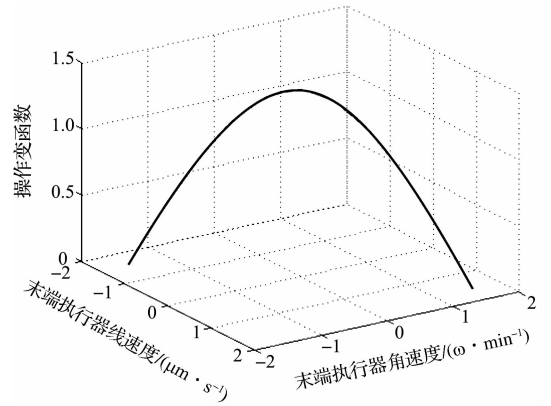


图 4 操作度函数变化曲线

体积元函数的变化趋势如图 5 所示。

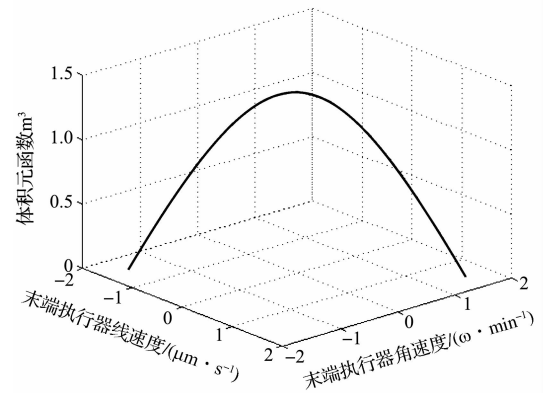


图 5 体积元函数变化曲线

从图(4,5) 可以看出: 操作度函数和体积元函数的变化趋势和极值点都相同, 所以用体积元衡量纤维丝束自动铺放机器人运动学性能是可行的。

5 结束语

本研究通过引入活动标架和外微分, 分析了 7 自由度纤维丝束自动铺放机器人的运动学, 并根据运动学基于活动标架与外微分定义了体积元函数, 并用计算了 7 自由度纤维丝束自动铺放机器人的体积元函数, 提出用体积元函数作为衡量 7 自由度纤维丝束自动铺放机器人运动性能的指标。本文通过和 YOSHIKAWA 提出的基于 Jacobian 矩阵的可操作度 $w = \sqrt{\det(JJ^T)}$ 对比可知: 本文所提出的用体积元函数来作为衡量 7 自由度纤维丝束自动铺放机器人运动性能是可行的。

参考文献 (References):

- [1] DUBRAVIK M. Application of natural fibres in hybrid composite materials [J]. **Materials Science Forum**, 2015 (818):311-315.
- [2] VAN L M, HILKER T, COOPS N C. Assessment of standing wood and fiber quality using ground and airborne laser scanning: review [J]. **Forest Ecology and Management**, 2011,261(9):1467-1478.
- [3] CARROLL G. Automated processes for composite aircraft structure [J]. **Industrial Robot: An International Journal**, 2006,33(2):117-121.
- [4] 孙 成. 复合材料翼梁自动铺丝技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学材料科学与技术学院,2013.
- [5] 邵忠喜,富宏亚,韩振宇. 纤维铺设设备机械手臂末端运动轨迹的后置处理技术研究[J]. 宇航学报,2008,29(6):2023-2029.
- [6] 倪 杭,王贺升,陈卫东. 基于软体机器人冗余自由度的实时避障位置控制[J]. 机器人,2017,39(3):265-271.
- [7] 霍希建,刘伊威,姜 力,等. 具有关节限位的 7R 仿人机械臂逆运动学优化[J]. 吉林大学学报:工学版,2016,46(1):213-220.
- [8] 黄水华,江 沛,韦 巍,等. 基于四元数的机械手姿态定向控制[J]. 浙江大学学报:工学版,2016,50(1):173-179,192.
- [9] YOSHIKAWA T. Analysis and control of robot manipulators with redundancy [C]. Proc 1st Int Symp of Robotics Research, Cambridge: MIT press, 1984.
- [10] SALISBURY J K, CRAIG J. Articulated hands: kinematics and force control issues [J]. **The International Journal of Robotics Research**, 1982,1(1):4-17.
- [11] ANGELES J, ROJAS A A. Manipulator inverse kinematics via condition number minimization and constitution[J]. **Int. J. Robotics and Automation**, 1987,2(2):61-69.
- [12] KLEIN C A, BLAHO B E. Dexterity measures for the design and control of kinematically redundant manipulators [J]. **Inter. J. of Robotics Research**, 1987,6(2):72-83.
- [13] 郭希娟,耿清甲. 串联机器人加速度性能指标分析[J]. 机械工程学报,2008,44(9):56-60.
- [14] GOSSELIN C, ANGLES J. A global performance index for the kinematics optimization of robotic manipulator [J]. **Transactions of the ASME**, 1991,113(9):220-226.
- [15] 张连东. 基于微分几何学的机器人操作性能的研究[D]. 大连:大连理工大学机械工程学院,2004.
- [16] RICHARD M,李泽湘,SHANKAR S. 机器人操作的数学导论[M]. 北京:机械工业出版社,1998.
- [17] 殷志锋,葛新锋. 自动铺丝机器人 Jacobian 矩阵空间算子代数描述[J]. 西安工程技术大学学报,2012,26(5):633-637.

[编辑:张豪]

本文引用格式:

栗伟周,葛新锋. 自动铺丝机器人的运行学性能指标分析研究[J]. 机电工程,2018,35(8):◆-◆,◆.

LI Wei-zhou, GE Xin-feng. Kinematics performance index of automated fiber placement robotic manipulator[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2018,35(8):◆-◆,◆.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>