

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2015.04.028

自动铺丝机器人运动学逆解的求解算法

郭娟¹, 林勇²

(1. 安阳职业技术学院 电大工作部, 河南 安阳 455000; 2. 浙江工业大学 之江学院, 浙江 杭州 310024)

摘要: 针对自动铺丝机器人逆运动学求解问题, 提出了一种基于位置矢量和姿态变换矩阵相结合的求解算法。首先采用D-H参数法建立了机器人的运动学方程并确定连杆参数, 根据其3个转动关节轴线交于一点的结构特点, 利用末端操作器的位置矢量和姿态变换矩阵进行了3个移动变量和3个旋转变量求解。最后, 以某型号飞机的S形进气道加工为例, 对铺丝机器人末端执行器的运动轨迹进行了仿真分析。研究表明, 该求解算法有效且取得了良好的效果。

关键词: 机器人; 逆运动学; 位置矢量; 姿态变换矩阵

中图分类号: TP242; TH39 文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2015)04-0575-04

Inverse kinematics algorithm for the automated fiber placement robotic manipulator

GUO Juan¹, LIN Yong²

(1. Department of Dianda Working, Anyang Vocational and Technical College, Anyang 455000, China;
2. Zhijiang College, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310024, China)

Abstract: Aiming at solving inverse kinematics of the automated fiber placement robotic manipulator, an algorithm based on the position vector and posture transformation matrix was proposed. Firstly the kinematics equation of the robot was established based on the D-H parameter and its link parameters were determined. Finally taking the S shaped inlet processing of one type of plane as an example, the simulation of the motion trajectory of the end effector was made. The results indicate that the proposed algorithm is effective.

Key words: robotic manipulator; inverse kinematics; position vector; posture transfer matrix

0 引 言

自动铺丝技术是一种新型复合材料制造技术。近年来, 自动铺丝技术的发展十分迅速, 已广泛用于F22、F35、V22、A380等飞机零部件的研制^[1-2]。国内自动铺丝技术的研究也有所突破, 但大都是对于铺丝材料和相关软件进行研究^[3-4], 对于铺丝装备的研究则刚刚起步, 对于形状复杂零件的铺丝装备的研究更是鲜见报道。铺丝机器人研究开发的目的是为形状复杂零件的制造提供工具。根据铺丝路径的规划, 以多种姿态达到指定位置, 完成规定的铺丝任务, 这些都需要机器人去完成。机器人运动学分析是机器人研

究的基础, 对于串连铺丝机器人来说逆运动学求解问题尤为重要。

目前, 求解机器人运动学逆解问题主要有代数法^[5-8]、几何法和数值算法等。数值法分为直接法和间接法, 直接法有Newton法和Newton-Lipson法^[9]。如果Jacobi矩阵奇异, 数值法没有可行解。如果初始位置不是充分接近目标位置, 问题也不可解。间接算法是基于优化的方法, 这种解法主要包括CCD法、BFS法、CCD&BFS法和遗传算法等。但这些算法都比较复杂, 不能用于实时求解。

根据自动铺丝机器人的具体结构特点, 本研究利用末端操作器的位置矢量和方向矩阵分别求3个转动关节变量和3个转动关节变量。与一般的迭代算法相

收稿日期: 2014-06-23

作者简介: 郭娟(1979-), 女, 河南南阳人, 主要从事机器人自动化理论及应用方面的研究。E-mail: linyong@zju.edu.cn

比,这种算法可减少矩阵求逆的次数,求解速度快,表达简单,便于实时控制。

1 自动铺丝机器人的拓扑结构和参数

自动铺丝机器人是一个开链的空间连杆机构,由3个移动关节和3个转动关节串联而成,3个转动关节的轴线交于一点,开链的一端固定在基座上,另一端自由,自由端安装工具(称为末端操作器),用来完成铺丝任务,与末端操作器相对的是一具有旋转运动的芯模,其结构如图1所示。

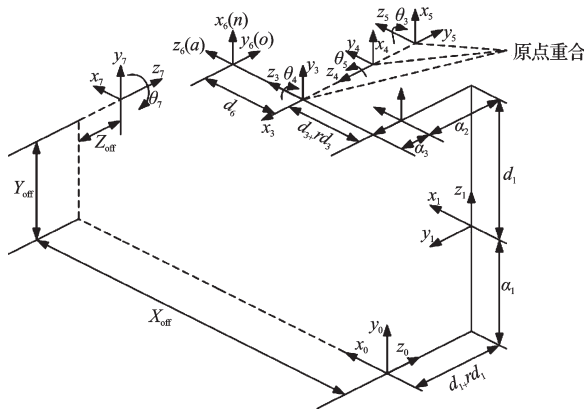


图1 自动铺丝机器人的结构示意图

铺丝机器人的铺放运动是由芯模的旋转运动和铺丝机器人的平移和转动合成的。铺放过程中,机器人末端操作器始终在芯模表面上,所以机器人末端的运动实际上就是在芯模表面上沿特定轨迹的运动。为了分析机器人的运动学特性,本研究首先建立连杆坐标系,然后研究这些坐标系之间的关系,并采用D-H参数法建立机器人的运动学方程。其D-H参数如表1所示。

表1 自动铺丝机器人的连杆参数

连杆 <i>i</i>	a_{i-1}/mm	$\alpha_{i-1}/(^{\circ})$	d_i/mm	$\theta_i/(^{\circ})$	关节变量范围
1	0	0	d_1	0	$d_1: -150 \text{ mm} \sim 150 \text{ mm}$
2	0	90	d_2	-90	$d_2: -110 \text{ mm} \sim 110 \text{ mm}$
3	a_2	90	d_3	0	$d_3: -100 \text{ mm} \sim 100 \text{ mm}$
4	0	0	c	θ_4	$\theta_4: -210^{\circ} \sim 210^{\circ}$
5	0	90	0	θ_5	$\theta_5: -150^{\circ} \sim 150^{\circ}$
6	0	-90	0	θ_6	$\theta_6: -260^{\circ} \sim 260^{\circ}$

2 自动铺丝机器人的运动学解

机器人的运动学求解分为运动学正解和运动学逆解,运动学逆解是运动学正解的逆过程。从关节空间到操作空间的映射称为正向运动学,对于串联机器人来说,通过位姿变换矩阵的简单乘积就可以求出,而且解是唯一的。逆运动学问题是从操作空间到关

节空间的映射,一般来说,逆运动学问题比正向运动学问题要复杂得多^[10-11]。

假设机器人末端执行器的坐标系 $\{n\}$ 相对于基座坐标系 $\{0\}$ 的位姿变换矩阵为:

$${}^0T_n = {}^0T_1 T_2 T_3 \dots T_{n-1} T_n \quad (1)$$

式(1)称为机器人末端执行器的运动方程,它表示了末端执行器的位姿与关节变量之间的关系。

2.1 运动学正解

机器人运动学正解就是已知机器人关节变量的情况下,求末端执行器坐标系相对于基座坐标系的位姿。

假设机器人末端执行器坐标系相对于基座坐标系的位姿矩阵为:

$${}^0T_n = {}^0T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T = \begin{bmatrix} {}^0n_x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ {}^0n_y & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ {}^0n_z & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

根据式(2),利用Matlab编程,可求得 0T_n 中各元素的值:

$$\begin{cases} {}^0n_x = -\sin \theta_5 \cos \theta_6 \\ {}^0n_y = -\sin \theta_4 \cos \theta_5 \cos \theta_6 - \cos \theta_4 \sin \theta_6 \\ {}^0n_z = \sin \theta_4 \sin \theta_6 - \cos \theta_4 \cos \theta_5 \cos \theta_6 \\ {}^0o_x = \sin \theta_5 \sin \theta_6 \\ {}^0o_y = \sin \theta_4 \cos \theta_5 \sin \theta_6 - \cos \theta_4 \cos \theta_6 \\ {}^0o_z = \cos \theta_4 \cos \theta_5 \sin \theta_6 + \sin \theta_4 \cos \theta_6 \\ {}^0a_x = -\cos \theta_5 \\ {}^0a_y = \sin \theta_4 \sin \theta_5 \\ {}^0a_z = \cos \theta_4 \sin \theta_5 \\ {}^0p_x = -c - d_3 \\ {}^0p_y = -d_2 \\ {}^0p_z = d_1 - a_2 \end{cases} \quad (3)$$

从式(3)可以看出,末端执行器坐标系原点在基座坐标系中的坐标 (p_x, p_y, p_z) 完全由3个移动关节变量 d_1, d_2, d_3 确定;而它的姿态 $(n_x, o_x, a_x), (n_y, o_y, a_y), (n_z, o_z, a_z)$ 则由3个转动关节变量 $\theta_4, \theta_5, \theta_6$ 确定。因此通常把3个移动关节称为机器人的位置关节,3个转动关节称为机器人的姿态关节。

2.2 运动学逆解

铺丝机器人运动学逆解是运动学正解的逆过程,就是已知末端执行器的空间位姿以及各连杆的结构参数,求出各关节的位姿变量。但是由于运动学逆解非常复杂,其解可能有很多,也可能没有,而且一般没有封闭形式的解。但对于6自由度的串联机器人,可以证明,当有相邻3个关节轴线交于一点或相互平行时存在封闭形式的运动学逆解^[12-14]。自动铺丝机器人3个转动关节轴线交于一点,因此具有封闭形式的逆解。

根据自动铺丝机器人的3个转动关节轴线交于一点的特点,利用末端执行器的位置矢量和姿态变换矩阵分别求3个移动关节变量和3个转动关节变量。由姿态变换关系可知,末端执行器坐标系相对于基座坐标系的位置矢量为:

$${}^0P_6 = {}^0T_1{}^1T_2{}^2T_3{}^3P_6 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -d_2 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_2 \\ 0 & 0 & -1 & -d_3 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -c-d_3 \\ -d_2 \\ d_1-a_2 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

令末端执行器坐标系 T 相对芯模坐标系 S 的姿态变换矩阵为 sT , 则有:

$${}^sT = {}^sT_6{}^6T_7{}^7T = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$T_4^3T_5^4T_6^5 = \begin{bmatrix} \cos\theta_4 & -\sin\theta_4 & 0 & 0 \\ \sin\theta_4 & \cos\theta_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta_5 & -\sin\theta_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ \sin\theta_5 & \cos\theta_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta_6 & -\sin\theta_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta_6 & -\cos\theta_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_4 \cos\theta_5 \cos\theta_6 - \sin\theta_4 \sin\theta_5 \sin\theta_6 & -\cos\theta_4 \cos\theta_5 \sin\theta_6 - \sin\theta_4 \cos\theta_5 \cos\theta_6 & -\cos\theta_4 \sin\theta_5 & 0 \\ \sin\theta_4 \cos\theta_5 \cos\theta_6 + \cos\theta_4 \sin\theta_5 \sin\theta_6 & -\sin\theta_4 \cos\theta_5 \sin\theta_6 + \cos\theta_4 \cos\theta_5 \cos\theta_6 & -\sin\theta_4 \sin\theta_5 & 0 \\ \sin\theta_5 \cos\theta_6 & -\sin\theta_5 \sin\theta_6 & \cos\theta_5 & c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

令:

$$({}^0T_1{}^1T_2{}^2T_3)^{-1}T_6^0 = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} & 0 \\ T_{21} & T_{22} & T_{23} & 0 \\ T_{31} & T_{32} & T_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

由式(9,10)可得转动关节变量:

$$\theta_5 = \arccos(T_{33}) = \arccos(-a_x) \quad (11)$$

当 $\theta_5 = 0$ 时,机器人处于奇异位形,不能求出 θ_4 和 θ_6 ; 当 $\theta_5 \neq 0$, 可以求得:

$$\begin{cases} \theta_4 = \arctan(T_{23}/T_{13}) = \arctan(-a_z/a_y) \\ \theta_6 = \arctan(-T_{32}/T_{31}) = \arctan(-o_x/n_x) \end{cases} \quad (12)$$

需要说明的是,运动学逆解有可能存在多解的现象。但是,在出现多解的现象时,由于机器人结构的限制,例如关节不能在 360° 范围内转动,导致有些解是不能实现的。因此在出现多解的情况下,往往选取其中最合适的一组解来满足机器人的工作要求。

3 铺丝机器人运动学仿真分析

运动学仿真是验证所给出的运动学方程以及运

从而有:

$${}^0T = {}^sT^{-1}{}^sT_7{}^7T_7^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -X_{\text{off}} \\ 0 & 0 & -1 & -Z_{\text{off}} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -d \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & -d \cdot a_x + p_x - X_{\text{off}} \\ -n_z & -o_z & -a_z & d \cdot a_z - p_z - Z_{\text{off}} \\ n_y & o_y & a_y & -d \cdot a_y + p_y \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

由式(6)可知:

$${}^0P_6 = \begin{bmatrix} -d \cdot a_x + p_x - X_{\text{off}} \\ d \cdot a_z - p_z - Z_{\text{off}} \\ -d \cdot a_y + p_y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

联立式(6,7)可得移动关节变量:

$$\begin{cases} d_1 = p_y - d \cdot a_y + a_2 \\ d_2 = Z_{\text{off}} + p_z - d \cdot a_z \\ d_3 = d \cdot a_x + X_{\text{off}} - c - p_x \end{cases} \quad (8)$$

由 $T_6^0 = T_1^0T_2^1T_3^2T_4^3T_5^4T_6^5$ 知 $(T_1^0T_2^1T_3^2)^{-1}T_6^0 = T_4^3T_5^4T_6^5$ 。

动学正解和逆解的算法是否正确,为进一步求解动力学打下基础。某型号飞机的S形进气道就是通过铺丝机器人缠绕制造出来的零件,某飞机的S形进气道的芯模示意图如图2所示。



图2 某型号飞机的S形进气道

在铺丝过程中,芯模上的期望轨迹如图3所示。

通过对某型号飞机的S形进气道的期望铺丝轨迹通过所求解的逆运动学解进行仿真实验,得到的末端执行器仿真铺丝轨迹如图4所示。对比图3和图4,发

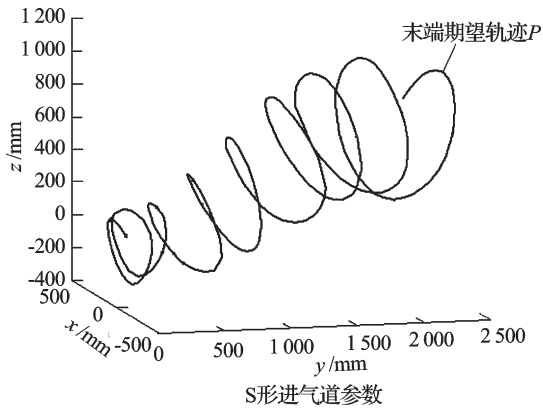


图3 末端执行器的期望轨迹

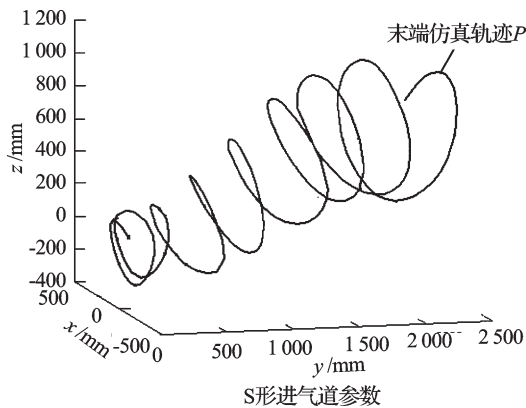


图4 末端执行器的仿真轨迹

现所得仿真铺丝轨迹和期望铺丝轨迹一致,说明建立的自动铺丝机器人的运动学方程以及运动学正解和逆解的求解算法是正确的。

4 结束语

根据自动铺丝机器人的简化模型,本研究利用D-H参数建立了机器人的运动学方程,并对运动学正解和逆解进行分析,提出了一种适合该铺丝机器人的运动学逆解的求解算法,该算法减少了矩阵的求逆运算次数,提高了逆解得运算速度;根据期望轨迹,运用所建立的运动学方程进行了仿真验证,仿真结果表明所建立的运动学方程和提出的逆解算法是正确的。

参考文献(References):

- [1] 郝建伟. 复合材料制造自动化技术发展[J]. 航空制造技术, 2010(17): 26-29.
- [2] 陈亚莉. 航空复合材料自动化技术进展[J]. 航空科学技术, 2011(4): 14-15.
- [3] GE Xin-feng, ZHAO Dong-biao, LU Yong-hua, et al. Study of dynamics performance index of the automated fiber placement robotic manipulator[J]. **Journal of Information and Computational Science**, 2011, 8 (14) : 2795-2982.
- [4] ZHANG Z, SARHADI M. An integrated CAD/CAM system for automated composite manufacture[J]. **Journal of Materials Processing Technology**, 1996(1-2): 104-109.
- [5] 刘亚军, 黄田. 6R操作臂逆运动学分析与轨迹规划[J]. 机械工程学报, 2012, 48(3): 9-15.
- [6] 陈鹏, 刘璐, 余飞, 等. 一种仿人机械臂的运动学逆解的几何求解算法[J]. 机器人, 2012, 34(2): 211-216.
- [7] LI C, WANG T. A combined optimization method for solving the inverse kinematics problem of mechanical manipulators[J]. **IEEE Trans of Robotics and Automation**, 1991, 7(4): 489-499.
- [8] ZHAO Xin-hua. A successive approximation algorithm for the inverse position analysis of serial manipulator[J]. **Robotica**, 1999, 17(6): 487-489
- [9] WAMPER C, MORGAN A, SOMMESE A. Numerical continuation methods for solving polynomial systems arising in kinematics[J]. **ASME J. Mech. Design**. 1990(112): 59-68
- [10] HUO Li-guo. Robotic Joint-Motion Optimization of Functionally-Redundant Tasks for Joint-Limits and Singularity Avoidance [D]. Montréal: University of Montréal, Canada, 2009.
- [11] 熊有伦. 机器人学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1993.
- [12] SCIAVICCO L, SICILIANO B. Modeling and control of robot manipulators[J]. **Springer**, 2000(3): 377-381.
- [13] HUSTY M L, PFURNER M. A new and efficient algorithm for the inverse kinematics of a general serial 6R manipulator[J]. **Mechanism and Machine Theory**, 2007(42): 66-81.
- [14] 刘连忠, 汪一彭, 张启先. 机器人逆运动学的数值解法[J]. 北京航空航天大学学报, 1995(1): 120-125.

[编辑: 张 豪]

本文引用格式:

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.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>