

SCARA 机器人运动学分析及 MATLAB 建模仿真

Kinematic Analysis and MATLAB Modeling and Simulation of SCARA Robot

左国栋 赵智勇 王冬青 (青岛大学自动化与电气工程学院, 山东 青岛 266071)

摘要:利用 D-H 参数法对 SCARA 机器人进行建模,得到了机器人正运动学和逆运动学方程。在 MATLAB Robotics Toolbox 的平台下,对机器人的简单运动进行了仿真,得到了各关节变量随时间变化的关系,直观反映出机器人各个关节的运动状态。仿真结果表明,所建模型是合理有效的。

关键词:SCARA 机器人, D-H 参数法, 轨迹规划, MATLAB 仿真

Abstract:In this paper, the SCARA robot is modeled by using the D-H parameter and then forward and inverse kinematics analysis is obtained. The simple motion of the robot is simulated under the platform of MATLAB Robotics Toolbox, which gives the curves mechanical arm joint angle, velocity and acceleration with time change and can reflect the motion state of each joint of the robot directly. The simulation results show that the model is reasonable and effective.

Keywords:dobot robot, D-H modeling, trajectory planning, MATLAB simulation

SCARA 平面关节机器人是目前使用最广泛的机器人。SCARA 系统在 X、Y 方向上具有顺从性,而在 Z 轴方向具有良好的刚度^[1],在装配作业中得到了广泛应用,因此有必要对 SCARA 机器人进行研究。轨迹规划在机器人学中占有极其重要的地位,任何作业的完成都离不开轨迹规划。本文将借助 MATLAB,利用 D-H 参数法对 SCARA 机器人建模,进一步进行机器人的轨迹规划。

表 1 SCARA 机器人
D-H 参数表

1 SCARA 机器人运动学分析

SCARA 机器人是一种平面关节型工业机器人,共有 3 个旋转关节(分别是 1、2 和 4 关节),其轴线相互平行,实现平面内定位和定向;另 1 个关节是移动关节(3 关节),实现末端执行器升降运动^[2]。如图 1 建立各连杆之间的 D-H 坐标系。

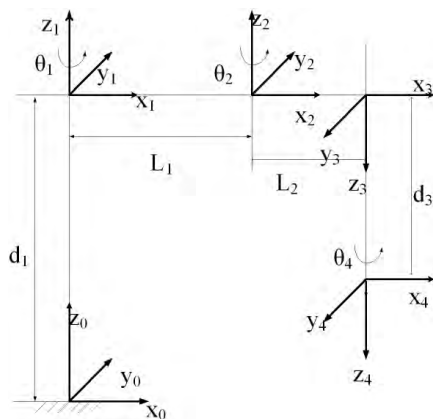


图 1 SCARA D-H 参考坐标系

表 1 中, θ_1 、 θ_2 、 d_3 和 θ_4 是各个关节变量。

1.1 SCARA 正运动学

假设有一个构型已知的机器人,即它的所有连杆长度和关节角度都是已知的,那么计算机器人手的位姿就称为正运动学分析。换言之,如果已知所有机器人关节变量,用正运动学方程就能计算任何一瞬间机器人的位姿^[3]。

为了简化表达,令 $c_1=\cos(\theta_1)$, $c_2=\cos(\theta_2)$, $c_3=\cos(\theta_3)$, $s_1=\sin(\theta_1)$, $s_2=\sin(\theta_2)$, $s_3=\sin(\theta_3)$, $s_{23}=\sin(\theta_2+\theta_3)$, $c_{23}=\cos(\theta_2+\theta_3)$ 。

由 D-H 转换法则得,各坐标系转换矩阵分别为:

$${}^0T_1=A_1=\begin{bmatrix} c_1 & -s_1 & 0 & l_1c_1 \\ s_1 & c_1 & 0 & l_1s_1 \\ 0 & 0 & 1 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$${}^1T_2=A_2=\begin{bmatrix} c_2 & s_2 & 0 & l_2c_2 \\ s_2 & -c_2 & 0 & l_2s_2 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$${}^2T_3=A_3=\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$${}^3T_4=A_4=\begin{bmatrix} c_4 & -s_4 & 0 & 0 \\ s_4 & c_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式(1)至式(4)矩阵相乘,得到如下机器人的基座和末端执行器之间的总变换:

$${}^0T_4=A_1A_2A_3A_4=\begin{bmatrix} \cos(\theta_1+\theta_2-\theta_4) & \sin(\theta_1+\theta_2-\theta_4) & 0 & l_2c_2 \\ \sin(\theta_1+\theta_2-\theta_4) & -\cos(\theta_1+\theta_2-\theta_4) & 0 & l_2s_2 \\ 0 & 0 & -1 & d_1-d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

1.2 SCARA 逆运动学

为了使机器人手臂处于期望的位姿,要确定机器人的所有关节变量,就需要机器人的逆运动学解^[3]。令 SCARA 机器人末端执行器期望位姿为:

$${}^R T_H=\begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

由式(5)和式(6)相等,可得:

$${}^R T_H=A_1A_2A_3A_4={}^0T_4$$

$$\begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\theta_1+\theta_2-\theta_4) & \sin(\theta_1+\theta_2-\theta_4) & 0 & l_2c_2 \\ \sin(\theta_1+\theta_2-\theta_4) & -\cos(\theta_1+\theta_2-\theta_4) & 0 & l_2s_2 \\ 0 & 0 & -1 & d_1-d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

式(7)两边同时左乘:

$$A_1^{-1} = \begin{bmatrix} c_1 & s_1 & 0 & -l_1 \\ -s_1 & c_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{得到:}$$

$$\begin{aligned} A_1^{-1} {}^R T_H &= A_2 A_3 A_4 \\ &= \begin{bmatrix} n_x c_1 + n_y s_1 & o_x c_1 + o_y s_1 & a_x c_1 + a_y s_1 & p_x c_1 + p_y s_1 - l_1 \\ -n_x s_1 + n_y c_1 & -o_x s_1 + o_y c_1 & -a_x s_1 + a_y c_1 & -p_x s_1 + p_y c_1 \\ n_z & o_z & a_z & p_z - d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \cos(\theta_1-\theta_4) & -\sin(\theta_1-\theta_4) & 0 & l_2c_2 \\ \sin(\theta_1-\theta_4) & \cos(\theta_1-\theta_4) & 0 & l_2s_2 \\ 0 & 0 & -1 & -d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (8)$$

由式(8)两边矩阵对应元素(1,4)和(2,4)相等,得到:

$$\begin{cases} p_x c_1 + p_y s_1 = l_2 c_2 + l_1 \\ -p_x s_1 + p_y c_1 = l_2 s_2 \end{cases} \quad (9)$$

将式(9)中2个方程两边分别平方相加可得:

$$\cos\theta_2 = \frac{p_x^2 + p_y^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1 l_2}$$

$$\sin\theta_2 = \sqrt{1 - \cos^2\theta_2}$$

$$\theta_2 = \arctan \frac{\sin\theta_2}{\cos\theta_2}$$

将 $\cos\theta_2$ 、 $\sin\theta_2$ 代入式(9),求得:

$$\sin\theta_1 = \frac{(l_1 + l_2 \cos\theta_2) p_y - l_2 \sin\theta_2 p_x}{p_x^2 + p_y^2}$$

$$\cos\theta_1 = \frac{(l_1 + l_2 \cos\theta_2) p_x + l_2 \sin\theta_2 p_y}{p_x^2 + p_y^2}$$

$$\theta_1 = \arctan \frac{\sin\theta_1}{\cos\theta_1}$$

由式(8)两边矩阵元素(3,4)对应相等得到:

$$d_3 = d_1 - p_z$$

$$\text{式(8)左乘 } A_2^{-1} = \begin{bmatrix} c_2 & s_2 & 0 & -l_2 \\ s_2 & -c_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_3^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{得到:}$$

$$\begin{aligned} A_3^{-1} A_2^{-1} A_1^{-1} {}^R T_H &= A_4 \\ &= \begin{bmatrix} n_x \cos(\theta_1+\theta_2) + n_y \sin(\theta_1+\theta_2) & o_x \cos(\theta_1+\theta_2) + o_y \sin(\theta_1+\theta_2) & 0 & 0 \\ n_x \sin(\theta_1+\theta_2) - n_y \cos(\theta_1+\theta_2) & o_x \sin(\theta_1+\theta_2) - o_y \cos(\theta_1+\theta_2) & 0 & 0 \\ -n_z & -o_z & -a_z & -p_z + d_1 - d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} c_4 & -s_4 & 0 & 0 \\ s_4 & c_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

由方程两边矩阵对应元素(1,1)和(2,1)相等得到:

$$\cos\theta_4 = n_x \cos(\theta_1+\theta_2) + n_y \sin(\theta_1+\theta_2)$$

$$\sin\theta_4 = n_x \sin(\theta_1+\theta_2) - n_y \cos(\theta_1+\theta_2)$$

$$\theta_4 = \arctan \frac{\sin\theta_4}{\cos\theta_4}$$

因此由期望的位姿可得各关节变量 θ_1 、 θ_2 、 d_3 和 θ_4 。

2 MATLAB 仿真

设置表1中各个连杆参数分别为: $d_1=100\text{mm}$; $l_1=50\text{mm}$; $l_2=150\text{mm}$ 。

利用 MATLAB Robotics Toolbox 建立 SCARA 机器人模型,将工作空间根据实际情况选定为 $[-300 \ 300 \ -300 \ 300 \ -300 \ 300]$,并将机器人命名为 'SCARA',构建机器人程序如下,并得到机器人的初始位姿^[4-5]。

```
L1=Link([0 100 50 0 0]);
L2=Link([0 0 150 pi 0]);
L3=Link([0 0 0 0 1]);
L4=Link([0 0 0 0 0]);
SCARA=SerialLink([L1 L2 L3 L4], 'name', 'SCARA');
SCARA.plotopt=['workspace', [-300 300 -300 300 -300 300]];
plot(SCARA, [0 0 0 0])
```

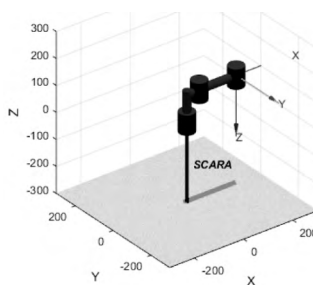


图2 SCARA 初始位姿

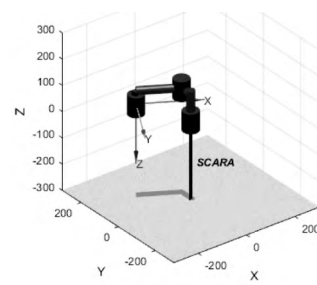


图3 SCARA 末位姿

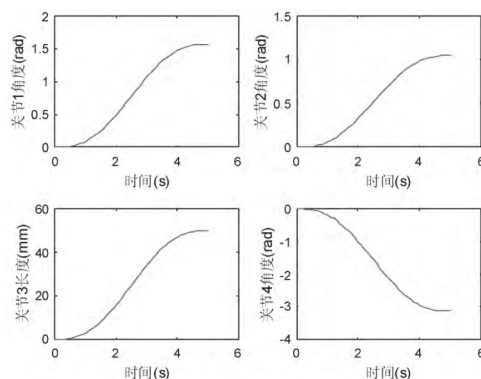


图4 各关节变量与时间的关系

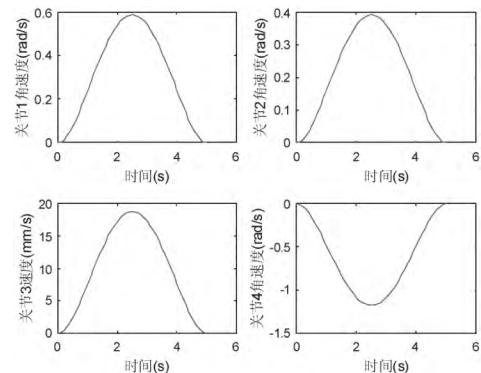


图5 各关节变量速度与时间的关系

假设机器人 5s 由初始位姿 $[0\ 0\ 0\ 0]$ 移动到如图 3 的末位姿 $[\pi/2\ \pi/3\ 50\ -\pi]$,在 MATLAB 平台下,得到的关节变量、变量速度、变量加速度随时间变化的图像^[6]如图 4~图 6 所示。

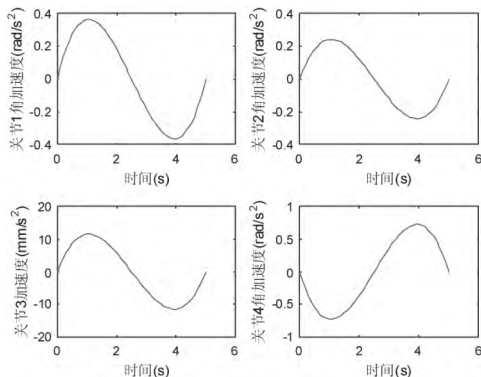


图 6 各关节变量加速度与时间关系

3 结束语

对 SCARA 机器人进行运动学建模以后,在 MATLAB Robotics Toolbox 下,完成了对机器人运动轨迹的仿真,得到了

各关节变量、速度和加速度随时间变化的曲线图形,正确快速地再现了机器人运动过程。可以看出,MATLAB 为实现机器人轨迹规划提供了强大的仿真能力,为机器人教学或科研提供了有力的平台。

参考文献

- [1]杨成文,张铁.基于 ADAMS 的 SCARA 机器人运动学仿真研究[J].机床与液压,2011,39(21):118-120
- [2]王健强,程汀.SCARA 机器人结构设计及轨迹规划算法[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2008,31(7):1026-1028
- [3]Saeed B.Niku.机器人学导论——分析、系统及应用[M].孙福春,朱纪洪,刘国栋,等,译.北京:电子工业出版社,2004
- [4]左富勇,胡小平,谢珂,等.基于 MATLAB Robotics 工具箱的 SCARA 机器人轨迹规划与仿真[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2012,27(2):41-44
- [5]高东强,杨磊,韩昆,张希峰.SCARA 机械手的轨迹规划及运动学分析[J].机械设计与制,2015(1):269-272
- [6]杨帆,张铮,夏添.四自由度 SCARA 机器人控制系统研究[J].湖北工业大学学报,2016(1):34-37

[收稿日期:2016.10.20]

(上接第 95 页)

- [9]刘勇华,李爱萍,段利国,等.以主观线索为特征的主观性文本识别[J].计算机工程与设计,2015,36(9):2572-2577
- [10]Turney P, Littman ML. Measuring praise and criticism: Inference of semantic orientation from association [C]//ACM Trans. On Information Systems, 2003, 21(4): 315-346
- [11]Montejo-Róez A, Martínez-Cámara E, Martín-Valdivia M T, et al.Ranked wordnet graph for sentiment polarity classification in twitter[J]. Computer Speech & Language, 2014, 28(1): 93-107
- [12]Pang B, Lee L, Vaithyanathan S. Thumbs up? Sentiment classification using machine learning techniques[C]//Isabelle P,

ed.Proc. of the EMNLP 2002. Morristown:ACL,2002:79-86

- [13]Prusa J, Khoshgoftaar T M, Dittman D J. Using Ensemble Learners to Improve Classifier Performance on Tweet Sentiment Data[C]//Information Reuse and Integration (IRI), 2015 IEEE International Conference on. IEEE, 2015:252-257
- [14]Bengio Y. Learning deep architectures for AI[J]. Foundations and trends in Machine Learning, 2009,2(1):1-127
- [15]Severyn A, Moschitti A. Twitter sentiment analysis with deep convolutional neural networks [C]//Proceedings of the 38th International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval. ACM, 2015:959-962

[收稿日期:2016.9.29]

(上接第 97 页)

面积就可以计算圆形度,判断是否为圆,由最小外接圆就可以求出圆心坐标即圆位置。

对于一些不规则图形,角点计算需要输入不同参数,以满足精度要求。

参考文献

- [1]桑卡,赫拉瓦卡,博伊尔.图像处理、分析与机器视觉[M].艾海舟,苏延超,译.北京:清华大学出版社,2011
- [2]廖强,周忆,米林,等.机器视觉在精密测量中的应用[J].重庆大学学报(自然科学版),2002,25(6):1-4

- [3]刘勇奎,魏巍,郭禾.压缩链码的研究[J].计算机学报,2007,30(2):281-287
- [4]刘斌,王涛.一种高效的平面点集凸包递归算法[J].自动化学报,2012,38(8):1375-1379
- [5]苏小红,丁进,马培军.用兴趣点凸包和 SVM 加权反馈实现图像检索[J].计算机学报,2009,32(11):2221-2228
- [6]祝世平,周锐,申功勋,等.圆孔(弧)型工件的三种图像检测算法[J].仪器仪表学报,1999,20(2):190-192,196
- [7]杨敏.基于机器视觉的发动机气门杆直径及圆度检测研究[D].广州:华南理工大学,2004:54-56

[收稿日期:2016.10.21]

(上接第 99 页)

度”最高,相应的预警级别也是最高,应引起最高的重视,可能是由于输入错误或者审计作假等造成的,要查明原因。第二类、第三类孤立点预警级别逐渐降低,也要引起重视。

3 结束语

经过系统实际的日常运行,证明我们的审计证据获取方法是可行并且高效的。

参考文献

- [1]韩家炜,堪博.数据挖掘:概念与技术(原书第 3 版)[M].范明,孟小

峰,等,译.北京:机械工业出版社,2012

- [2]王秀琼.孤立点挖掘在入侵检测中的应用研究[D].重庆:重庆大学,2005
- [3]Hawkins,D.Identification of Outliers [M].Chapman and Hall, London,1980
- [4]孙云,李舟军,陈火旺.孤立点检测算法及其在数据流挖掘中的可用性[J].计算机科学,2007,34(10):200-205
- [5]杨彬,康慕宁.基于概念的权重 PageRank 改进算法[J].情报杂志,2006(11)

[收稿日期:2016.10.6]