

文章编号:1005-0523(2022)05-0112-08



基于麦克纳姆轮的打磨机器人移动平台仿真分析

槐创锋, 金志裕

(华东交通大学机电与车辆工程学院, 江西 南昌 330013)

摘要:传统打磨机器人都是固定基座或者安装于导轨上,其机动性不高,工作区域有限。针对室内墙面打磨机器人需要具备高机动性,提出基于麦克纳姆轮的四轮打磨机器人移动平台。首先对单个麦克纳姆轮做结构分析,了解其运动方式;然后对麦克纳姆四轮移动平台做正、逆运动学分析,得到了四轮移动平台的逆运动学公式;接着在 Simulink 中建立逆运动学模型;最后在 Vrep 中进行正运动学验证。结果表明对麦克纳姆轮移动平台分析的正确性,以及麦克纳姆轮移动平台可以充分提高打磨机器人的机动性,为机器人自动打磨打下良好基础。

关键词:移动机器人;麦克纳姆轮;运动分析;Simulink;Vrep 运动仿真

中图分类号:TP242

文献标志码:A

本文引用格式:槐创锋,金志裕. 基于麦克纳姆轮的打磨机器人移动平台仿真分析[J]. 华东交通大学学报,2022,39(5):112-119.

Simulation Analysis of Mobile Platform of Grinding Robot Based on Mcnamu Wheel

Huai Chuangfeng, Jin Zhiyu

(School of Mechatronics and Vehicle Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang, 330013, China)

Abstract: Traditional grinding robots are fixed on the base or installed on the guide rail, which has low mobility and limited working area. Aiming at the high mobility of indoor wall grinding robot, a four-wheel grinding robot mobile platform based on Mcnamu wheel is proposed. Firstly, the structure of a single Mcnamu wheel is analyzed to understand its motion mode. Then, the forward and inverse kinematics of the Mcnamu four-wheel mobile platform is analyzed, and the inverse kinematics formula of the four-wheel mobile platform is obtained. In addition, the inverse kinematics model is established in Simulink. Finally, the forward kinematics is verified in Vrep. The results show that the analysis of the Mcnamu wheel mobile platform is correct, and the Mcnamu wheel mobile platform can fully improve the mobility of the grinding robot and lay a good foundation for the automatic grinding of the robot.

Key words: mobile robot; Mcnamu wheel; motion analysis; Simulink; Vrep dynamic simulation

Citation format: HUAI C F, JIN Z Y. Simulation analysis of mobile platform of grinding robot based on Mcnamu wheel[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2022, 39(5): 112-119.

在人工智能、智能制造的时代,自主移动机器人带来了一场新的技术创新风暴^[1-3]。根据运动机构不同的类型,自主移动机器人可以被设计为轮式移

动机器人、足式移动机器人或者轮足混合式移动机器人,其中轮式移动机器人发展最为广泛,也是相当流行的研究热点^[4-7]。AGV(automated guided vehicle)

是轮式移动机器人的一个典型代表,在其基础上的创新应用得到了广泛的考虑。

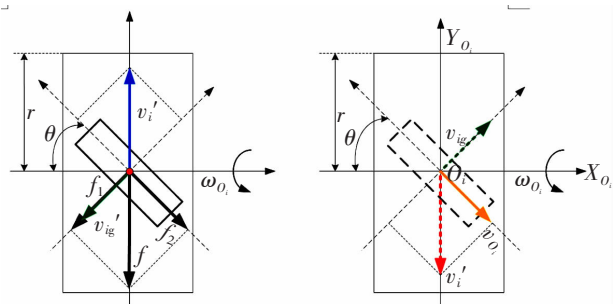
随着科技的进步,移动机器人的自主性、机动性研究吸引了越来越多的关注,其中移动机器人的机动性是移动机器人自主移动的基础^[8-14]。轮式移动机器人运动模式可分为差速轮型、单舵轮型、双舵轮型、全向轮型。差速轮型移动机器人灵活性较高,可以原地旋转,但是不能横向侧移,不适合重载^[15];单舵轮型移动机器人灵活性不高,双舵轮型相对于单舵轮型灵活性有提高,但两套舵轮提高了成本^[16-18];全向轮型移动机器人灵活性最高,可以实现任意方向的移动以及原地旋转,成本相对双舵轮型低,重载能力强。麦克纳姆轮是一种特殊结构的全向轮^[19-21],特点是在轮周边上有许多成一定角度斜向安装的辊子,这些成角度的辊子能使轮子旋转时产生一个横向运动的效果,四轮麦克纳姆轮移动平台依靠各自轮子的旋转方向和转速,最终可以合成任何方向上的运动速度和旋转从而保证移动平台能自由地运动。自主打磨机器人移动平台的选择很重要,直接影响打磨机器人的机动性,机动性是打磨机器人实现自主移动、扩大工作范围的基础^[22-25]。考虑到麦克纳姆轮的众多优点,自主打磨机器人移动平台采用四轮的麦克纳姆轮平台,为了给移动平台的控制打下良好基础,对麦克纳姆轮平台进行了运动学分析。移动平台的运动学分析主要有正运动学和逆运动学问题两类。由已知移动平台各轮的转向和转速,计算移动平台相对世界坐标系的速度,即为正运动学问题。要使移动平台运动到期望的位置,就需要计算出各轮的转向和转速,即为逆运动学问题。通过计算机仿真技术可以仿真模拟移动平台的真实效果,经过实际调试可以达到理想效果。

通过对单个麦克纳姆轮进行正运动学分析,接着对四轮麦克纳姆轮平台进行逆运动学分析,运用 Simulink 对移动平台进行逆运动学建模,结合 Vrep 软件对移动平台进行正运动学仿真验证,将仿真的结果以图形的形式表示出来,可以直观地显示移动平台的运动情况,为打磨机器人自主移动研究提供理论支撑。

1 单个麦克纳姆轮正运动学分析

麦轮是麦克纳姆轮的简称,麦轮正运动学是指通过4个轮子设定的相应转速和转向以获得移动平台

中心的运动状态(速度和角速度)。麦轮根据辊子安装角度方向不同分为A麦轮和B麦轮,如图1表示A麦轮与地面接触的辊子,图2表示B麦轮与地面接触的辊子,分别对A麦轮和B麦轮进行正运动学分析。



(a) Stress analysis diagram

(b) Velocity analysis diagram

图1 A麦轮运动学分析

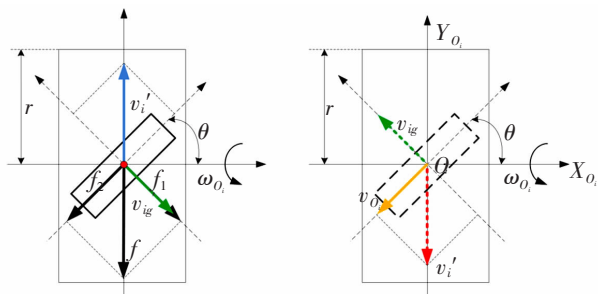
Fig.1 Kinematic analysis of type A Mcnamu wheel

图1是A麦轮的运动学分析图,图中辊子安装角度为 θ ,A麦轮绕自身转轴 X_{O_i} 以 ω_{O_i} 的角速度逆时针转动(右手定则,大拇指指向,四指弯曲指向的方向),图1(a)中红点为与地面接触的辊子上的接触点,蓝色的速度 v_i' 表示在A麦轮绕自身转轴 X_{O_i} 转动时接触点对应的线速度,方向平行于纸面向上。假设理想接触麦轮以地面接触不发生滑动,A麦轮受到地面施加的总摩擦力 f ,将 f 分解为平行于辊子轴线方向的 $f_{\parallel}$ 和垂直于辊子轴线的 $f_{\perp}$,由于辊子属于从动轮,在 $f_{\perp}$ 的作用下,会使辊子改变运动状态并使其顺着 $f_{\perp}$ 的方向转动起来,从而在接触点会有相对的线速度 v_g' 。根据滚轮在地面上滚动时,轴心的速度等于边缘接触点的线速度,方向与边缘接触点的线速度方向相反。图1(b)中 v_i'' 表示A麦轮在地面上滚动时轴心 O_i 相对的速度, v_{ig} 表示辊子在地面上滚动时轴心 O_i 相对的速度,正交分解可以看出速度 v_{ig} 抵消了一部分的速度 v_i'' ,也可以理解为速度 v_i'' 和速度 v_{ig} 合成的轴心 O_i 的总速度 v_{O_i} ,即A麦轮的实际真实速度,大小为

$$|v_{O_i}| = r\omega_{O_i} \sin(\theta) \quad (1)$$

方向沿着辊子轴线方向(平行纸面右斜向下)。同理对B麦轮进行运动学分析,如图2所示。

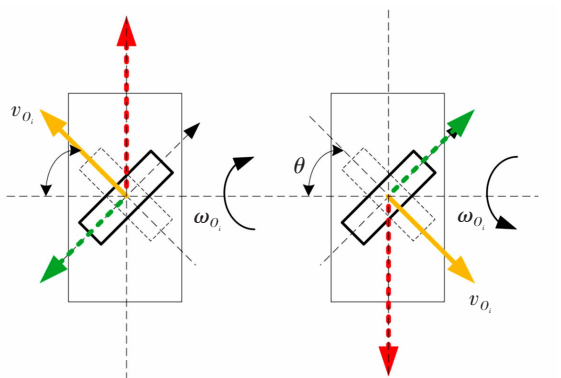
A麦轮和B麦轮分别以顺时针和逆时针转动,麦轮轴心 O_i 的速度 v_{O_i} 有所不同,如图3所示。垂直纸面方向从上往下看,虚线矩形表示下方与地面接触的辊子,实线矩形表示上方可见的辊子。



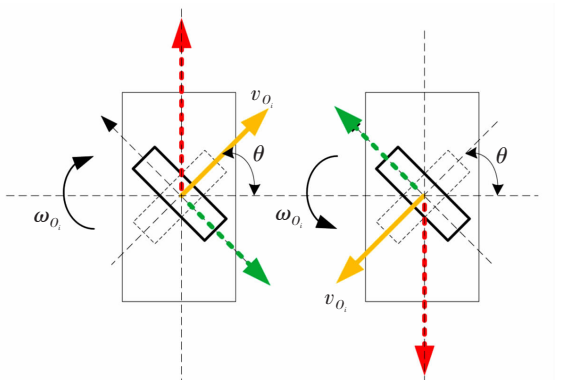
(a) Stress analysis diagram (b) Velocity analysis diagram

图 2 B 麦轮运动学分析

Fig.2 Kinematic analysis of type B Mcnamu wheel



(a) Speed analysis diagram of type A Mcnamu wheel when rotating clockwise and counterclockwise



(b) Speed analysis diagram of type B Mcnamu wheel when rotating clockwise and counterclockwise

图 3 A 麦轮和 B 麦轮速度分析

Fig.3 Speed analysis of Mcnamu wheel A and Mcnamu wheel B

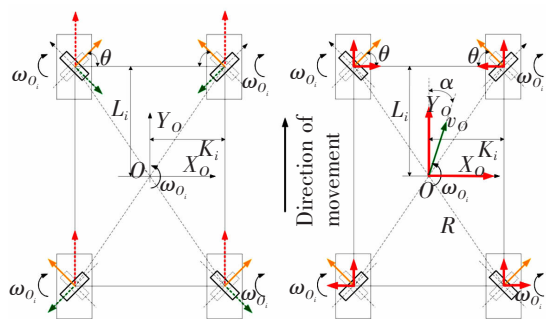
图 3(a)显示 A 麦轮顺时针和逆时针转动时速度分析图,图 3(b)显示 B 麦轮顺时针和逆时针转动时速度分析图,可以看到 A, B 麦轮轴心 O_i 的速度 v_{O_i} 都是斜向的速度。A 麦轮顺时针转动时可分解出一个向前的运动和一个向左的运动,逆时针转动时可分解出一个向后的运动和一个向右的运动;B 麦轮顺时针转动时可分解出一个向前的运动和一个

向右的运动,逆时针转动时可分解出一个向后的运动和一个向左的运动。正是因为麦轮的这种特性,与传统轮子相比麦轮可以解决侧向运动的问题,经过组合不同的麦轮以实现全向运动、原地旋转。

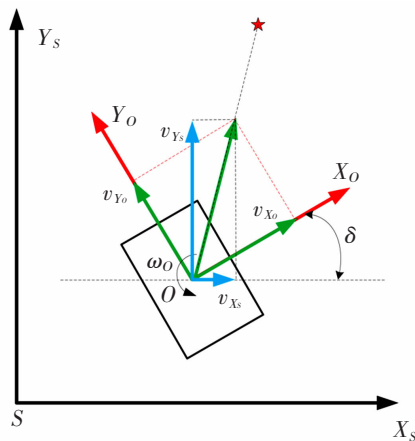
2 四麦轮逆运动学分析

麦轮逆运动学是指已知移动平台中心速度和角速度,求解 4 个麦轮对应的转速。上一节已经对单个麦轮进行了正运动学分析,了解了麦轮转动时轴心速度的大小和方向。接下来将对麦轮移动平台做逆运动学分析。

四轮麦轮组合有很多种,但不是所有组合都满足实际需求。自主打磨机器人采取 B-A-B-A 麦轮组合的移动平台,如图 4 所示,图 4(a)是移动平台向前运动时,4 个麦轮对应的转速和转向。对麦轮进行编号,以左前 B 麦轮为 1,逆时针计数,对应左后 A 麦轮为 2,右后 B 麦轮为 3,右前 A 麦轮为 4。



(a) Velocity analysis diagram (b) Establish coordinate system



(c) Coordinate analysis of mobile platform

图 4 移动平台运动分析

Fig.4 Motion analysis of mobile platform

图4(b)中 O 表示移动平台的中心点,对应坐标系 X_o-O-Y_o , O_i 表示对应麦轮的中心点,对应坐标系如图中所示。

v_o 表示移动平台中心的速度, $v_{o(i)}$ 表示移动平台中心速度在 i 麦轮坐标系中的速度, ω_o 表示移动平台绕中心轴 Z_o 旋转的角速度。 R_i 表示 i 麦轮轴心到移动平台的中心点的距离, α 表示移动平台中心速度与 Y_o 轴的夹角,得到移动平台中心的速度 $v_{o(i)}$ 与麦轮轴心的速度 v_{o_i} 之间的关系式

$$v_{o_i} = v_{o(i)} + \omega_o R_i \quad (2)$$

其中

$$v_{o_i} = v''_i + v_{ig} = \begin{bmatrix} 0 & \sin \theta \\ r & -\cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_{o_i} \\ v_{ig} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$v_{o(i)} = v_{X_o(i)} + v_{Y_o(i)} = \begin{bmatrix} v_{X_o(i)} \\ v_{Y_o(i)} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\omega_o \times R_i = \omega_o \times (L_i + K_i) = \begin{bmatrix} \omega_o L_i \\ \omega_o K_i \end{bmatrix} \quad (5)$$

由以上式得式(6)

$$\omega_o = \frac{1}{r} \left(\frac{v_{X_o(i)} + \omega_o L_i}{\tan \theta} + v_{Y_o(i)} + \omega_o K_i \right) \quad (6)$$

根据式(6),按图4(b)红色坐标系建立移动平台坐标系和各麦轮坐标系,且 $\theta=45^\circ$,得到各麦轮转速与移动平台运动状态的关系,如以下式

$$\begin{bmatrix} \omega_{o_1} \\ \omega_{o_2} \\ \omega_{o_3} \\ \omega_{o_4} \end{bmatrix} = \frac{1}{r} \begin{bmatrix} 1 & 1 & -(L+K) \\ -1 & 1 & -(L+K) \\ 1 & 1 & L+K \\ -1 & 1 & L+K \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{X_o} \\ v_{Y_o} \\ \omega_o \end{bmatrix} \quad (7)$$

设世界坐标系为 X_s-S-Y_s ,如图4(c)所示,为了降低分析难度,世界坐标原点与麦轮平台中心重合,麦轮平台中心速度在世界坐标系 X_s 轴上的投影为 v_{X_s} ,麦轮平台中心速度在世界坐标系 Y_s 轴上的投影为 v_{Y_s} ,麦轮坐标系的 X_o 轴与世界坐标系的 X_s 轴的夹角为 δ 。则可得到如下式

$$\omega_o = \delta \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} v_{X_s} \\ v_{Y_s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{X_o} \cos \delta - v_{Y_o} \sin \delta \\ v_{X_o} \sin \delta + v_{Y_o} \cos \delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \delta & -\sin \delta \\ \sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{X_o} \\ v_{Y_o} \end{bmatrix} \quad (9)$$

由式(9)得

$$\begin{bmatrix} v_{X_o} \\ v_{Y_o} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \delta & \sin \delta \\ -\sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{X_s} \\ v_{Y_s} \end{bmatrix} \quad (10)$$

由式(8)~式(10)得式(11)

$$\begin{bmatrix} \omega_{o_1} \\ \omega_{o_2} \\ \omega_{o_3} \\ \omega_{o_4} \end{bmatrix} = \frac{1}{r} \begin{bmatrix} \cos \delta - \sin \delta & \cos \delta + \sin \delta & -(L+K) \\ -\cos \delta - \sin \delta & \cos \delta - \sin \delta & -(L+K) \\ \cos \delta - \sin \delta & \cos \delta + \sin \delta & L+K \\ -\cos \delta - \sin \delta & \cos \delta - \sin \delta & L+K \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{X_s} \\ v_{Y_s} \\ \delta \end{bmatrix} \quad (11)$$

由式(11)可知

$$\omega_{o_1} + \omega_{o_4} = \omega_{o_2} + \omega_{o_3} \quad (12)$$

为了便于控制,麦轮平台平移运动和旋转运动分开作用,不同时进行,即有速度时, $\omega_o=0$;有角速度时, $v_{X_s}=v_{Y_s}=0$ 。

3 建立移动平台仿真模型

3.1 Vrep 软件介绍

Vrep 软件全称为 Virtual robot experimentation platform,中文名叫虚拟机器人实验平台,现在已经更名为 CoppeliaSim。根据软件名称可以知道 Vrep 是一个针对机器人的仿真模拟器,它集成了许多的开发环境并且是跨平台的,提供了多种控制接口,包含了各类现有的机器人模型(移动式和非移动式)、室内墙壁模型、家具模型、人物模型等,如果 Vrep 中没有合适的模型,也可以快速方便地搭建自己的模型,模型属性的脚本可以运用多种编程语言进行编程。Vrep 软件具有强大的兼容性,在 Windows 系统、Linux 系统、Mac 系统都可以运行,拥有多个物理引擎,多方面满足仿真的需求。Vrep 相比较于其他仿真软件,界面更友好,大大提高了仿真的效率。

3.2 麦轮平台仿真模型搭建

麦轮平台是打磨机器人机动性的保证,仿真麦轮平台的运动特性是十分重要的。Vrep 在移动机器人模型中提供了一款 KUKA YouBot 麦轮平台机器人模型,因为只研究麦轮移动平台的特性,去除 YouBot 机器人机械臂部分。在 YouBot 外观基础上,搭建自己的麦轮平台。麦轮的搭建由两个旋转关节组成,一个关节是提供麦轮旋转,设置为主动轮;另一关节是辊子旋转关节,设置为从动轮。辊子旋转关节轴相对于麦轮旋转关节轴成 45° 。

4个麦轮模型建立好后,需要为模型添加脚本,实现模型的驱动和运行。根据式(7)编写麦轮移动平台的脚本,完成脚本代码编写。

4 麦轮运动特性仿真结果

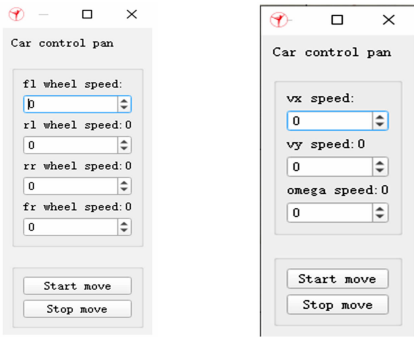
在麦轮正、逆运动学仿真中分别添加了一个 GUI 控制界面,如图 5 所示,方便改变各麦轮的运动状态,观看仿真结果。图 5(a)是麦轮正运动学 GUI 控制界面,图 5(b)是麦轮逆运动学 GUI 控制界面。

4.1 麦轮逆运动学特性仿真结果

在 Simulink 中搭建麦轮平台逆运动学模型,计算不同速度下对应的各麦轮转速。假设模型参数 $L=0.6\text{ m}$, $K=0.6\text{ m}$, $r=0.6\text{ m}$, 对机器人的运动进行模拟,实验移动平台在多种情况下运动,包括沿轴正、负方向移动, Y 轴正、负方向移动, $\pm 45^\circ$ 斜移, $\pm 135^\circ$ 斜移, 原地逆时针和顺时针旋共 10 种常见运动案例。

根据麦轮平台逆运动学 Simulink 模型计算每

种情况下各麦轮角速度,表 1 显示了移动平台不同运动状态下各麦轮对应的角速度。



(a) Control interface of forward kinematics of mobile platform (b) Control interface of inverse kinematics of mobile platform

图 5 麦轮正、逆运动学 GUI 控制界面
Fig.5 GUI control interface of Mcnamu wheel forward and inverse kinematics

表 1 通过求解逆运动学而得到的车轮角速度
Tab.1 Wheel angular velocity obtained by solving inverse kinematics

Motion state of Mcnamu wheel platform	Mcnamu wheel platform speed			Angular velocity of each Mcnamu wheel $\omega_{o_i}/(\text{rad/s})$			
	$v_{x_i}/(\text{m/s})$	$v_{y_i}/(\text{m/s})$	$\omega_o/(\text{rad/s})$	ω_{o_1}	ω_{o_2}	ω_{o_3}	ω_{o_4}
+X	1	0	0	2.5	-2.5	2.5	-2.5
-X	-1	0	0	-2.5	2.5	-2.5	2.5
+Y	0	1	0	2.5	2.5	2.5	2.5
-Y	0	-1	0	-2.5	-2.5	-2.5	-2.5
45°	1	1	0	5	0	5	0
-45°	1	-1	0	0	-5	0	-5
135	-1	1	0	0	5	0	5
-135°	-1	-1	0	-5	0	-5	0
Counterclockwise in place rotation	0	0	1	-3.5	-3.5	3.5	3.5
Clockwise in place rotation	0	0	-1	3.5	3.5	-3.5	-3.5

4.2 麦轮正运动学验证结果

将 4.1 中计算的各麦轮转速输入 Vrep 中搭建的仿真模型中,GUI 控制界面中的值都取整数,若取小数需要除以对应数量级。由于以上转速有一位小数,所以在仿真模型脚本中添加对应取值除以

10,得到仿真结果如图 6 所示,从图 6 中可以看到麦轮平台在各麦轮对应转速下实现了预期的运动,且可以实现传统车轮做不到的横向移动、斜向移动和原地旋转。

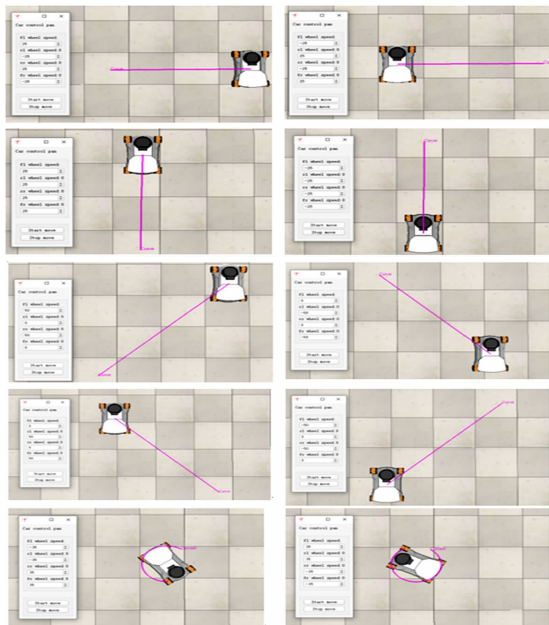


图6 仿真验证结果

Fig.6 Simulation verification results

4.3 麦轮平台轨迹运动验证结果

为了检验麦轮移动平台的全向运动性,基于ROS系统对麦轮移动平台做轨迹运动的仿真验证,并截取了一百秒数据,如图7,从图中可以看到麦轮移动平台在沿着给定轨迹运动时,移动平台中心绕Z轴的角速度值在零附近有一个极小的波动,由于数量级在千分之一,所以可以忽略不计,说明移动平台的方位角基本保持不变,证明了麦轮移动平台可以实现移动平面内全向任意移动。

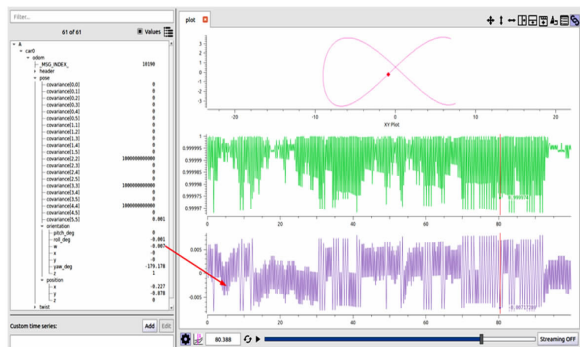


图7 轨迹运动仿真结果

Fig.7 Trajectory motion simulation results

5 结论

1) 通过对麦轮平台进行正、逆运动学分析,了解了麦轮的结构、麦轮的运动方式、麦轮安装组合等,推导出了移动平台运动学的正、逆解公式。

2) 利用 Simulink 建立逆运动学模型计算出各轮的转向和转速,在 Vrep 中进行仿真验证和轨迹运动仿真验证,结果验证了麦轮平台的逆运动学公式的正确性和麦轮移动平台优秀的全向移动性能。

3) 为控制移动平台提供理论基础,为打磨机器人后期的路径规划打下良好基础。

参考文献:

- [1] 李秀智,赫亚磊,孙炎珺,等. 基于复合式协同策略的移动机器人自主探索[J]. 机器人,2021,43(1):44-53.
LI X Z, HE Y L, SUN Y J, et al. Autonomous exploration of mobile robot based on compound cooperative strategy [J]. Robot, 2021, 43(1): 44-53.
- [2] ABBASI A, MAHMOUDZADEH S, YAZDANI A, et al. Feasibility assessment of Kian-I mobile robot for autonomous navigation[J]. Neural Computing and Applications, 2022, 34(2): 1199-1218.
- [3] IMRANE M L, MELINGUI A, MVOGO AHANDA J J B, et al. Artificial potential field neuro-fuzzy controller for autonomous navigation of mobile robots[J]. Journal of Systems and Control Engineering, 2021, 235(7): 1179-1192.
- [4] 倪洪杰,王宏霞,俞立. 轮式移动机器人快速轨迹跟踪[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2020, 52(10): 167-174.
NI H J, WANG H X, YU L. Fast trajectory tracking of wheeled mobile robots[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2020, 52(10): 167-174.
- [5] TZAFESTAS S G. Mobile robot control and navigation: A global overview[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2018, 91(1): 35-58.
- [6] WANG Y, LI X, ZHANG J, et al. Review of wheeled mobile robot collision avoidance under unknown environment[J]. Science Progress, 2021, 104(3): 00368504211037771.
- [7] MEDINA-SANTIAGO A, MORALES-ROSALES L A, HERNANDEZ-GRACIDAS C A, et al. Reactive obstacle-avoidance systems for wheeled mobile robots based on artificial intelligence[J]. Applied Sciences, 2021, 11(14): 6468.
- [8] 翟敬梅,刘坤,徐晓. 室内移动机器人自主导航系统设计与方法[J]. 计算机集成制造系统, 2020, 26(4): 890-899.
ZHAI J M, LIU K, XU X. Autonomous indoor navigation system of mobile robot[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2020, 26(4): 890-899.
- [9] 杨明辉,吴垚,张勇,等. 室内动态环境下的移动机器人自主避障策略[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, 50(8): 1833-1839.
YANG M H, WU Y, ZHANG Y, et al. Autonomous obstacle avoidance strategy for mobile robots in indoor dynamic environment[J]. Journal of Central South University (Science and Technology Edition), 2019, 50(8): 1833-1839.
- [10] 曹其新,黄先群,蒋宇捷,等. 动态环境中移动机器人多状态转换自主导航[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2019, 47(10): 22-27.
CAO Q X, HUANG X Q, JIANG Y J, et al. Autonomous

- navigation of mobile robot with multi-state transition in dynamic environment[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2019, 47(10): 22-27.
- [11] 张大志, 刘万辉, 缪存孝, 等. 全向移动机器人动态避障方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2021, 47(6): 1115-1123. ZHANG D Z, LIU W H, MIAO C X, et al. Dynamic obstacle avoidance method for omnidirectional mobile robots[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2021, 47(6): 1115-1123.
- [12] 杨国威, 王以忠, 王中任, 等. 自主移动焊接机器人嵌入式视觉跟踪控制系统[J]. 计算机集成制造系统, 2020, 26(11): 3049-3056. YANG G W, WANG Y Z, WANG Z R, et al. Embedded vision tracking control system for autonomous mobile welding robot[J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2020, 26(11): 3049-3056.
- [13] SERRANO-PEREZ O, VILLARREAL-CERVANTES M G, RODRIGUEZ-MOLINA A, et al. Offline robust tuning of the motion control for omnidirectional mobile robots[J]. Applied Soft Computing, 2021, 110: 107648.
- [14] 肖志成. 轮式移动机器人系统及避障技术研究[D]. 重庆: 重庆邮电大学, 2020. XIAO Z C. Research on wheeled mobile robot system and obstacle avoidance technology[D]. Chongqing: Chongqing University of Posts and Telecommunications, 2020.
- [15] 马国庆, 刘丽, 于正林, 等. 差速轮式移动机器人的导航算法研究及仿真实验[J]. 制造业自动化, 2018, 40(5): 28-31. MA G Q, LIU L, YU Z L, et al. Navigation algorithms and the simulation experiment of differential wheeled mobile robot[J]. Manufacturing Automation, 2018, 40(5): 28-31.
- [16] 许万, 罗西, 王琪, 等. 单舵轮 AGV 路径跟踪控制方法的研究[J]. 机械科学与技术, 2019, 38(10): 1526-1534. XU W, LUO X, WANG Q, et al. Exploring single steering wheel AGV path tracking controller[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2019, 38(10): 1526-1534.
- [17] 刘媛媛, 公建宁, 张萌, 等. 基于单舵轮 AGV 的 Gmapping SLAM 导航算法研究[J]. 制造业自动化, 2020, 42(2): 128-130. LIU Y Y, GONG J N, ZHANG M, et al. Research on gmapping slam navigation algorithm based on single steering wheel AGV[J]. Manufacturing Automation, 2020, 42(2): 128-130.
- [18] 齐嘉晖, 吴耀华, 汪威. 双舵轮自动导引车轨迹追踪控制算法[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(20): 8252-8260. QI J H, WU Y H, WANG W. Trajectory tracking control algorithm for double-steering automated guided vehicle[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(20): 8252-8260.
- [19] MELLAH S, GRATON G, EL ADEL E M, et al. Health state monitoring of 4-mecanum wheeled mobile robot actuators and its impact on the robot behavior analysis[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2021, 102(4): 1-22.
- [20] RAUNIYAR A, UPRETI H C, MISHRA A, et al. Mewbots: mecanum-mheeled robots for collaborative manipulation in an obstacle-clustered environment without communication[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2021, 102(1): 1-18.
- [21] ALWAN H M, VOLKOV A N, SHBANI A. Solution of inverse and forward kinematics problems for mobile robot with six mecanum wheels[C]//IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2021, 1094(1): 012071.
- [22] 吕作明. 轮式移动机器人机动性研究及实验平台实现[D]. 北京: 北方工业大学, 2021. LU Z M. Research on maneuverability of wheeled mobile robots and realization of an experimental platform[D]. Beijing: North China University of Technology, 2021.
- [23] 杨家武, 刘林, 王琢, 等. 基于 Mecanum 轮的轮腿式全方位移动机器人的研究及设计[J]. 现代电子技术, 2020, 43(5): 155-158. YANG J W, LIU L, WANG Z, et al. Research and design of wheel-legged omni-directional mobile robot based on Mecanum wheel[J]. Modern Electronics Technique, 2020, 43(5): 155-158.
- [24] 李之豪, 骆敏舟, 任彤, 等. 一种复杂环境高机动性轮式移动平台[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(2): 648-653. LI Z H, LUO M Z, REN T, et al. A high speed wheeled mobile platform for complex environments adaptation[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(2): 648-653.
- [25] 黄吉全. 全轮转向移动机器人运动学建模及机动性研究[D]. 北京: 北方工业大学, 2020. HUANG J Q. Kinematics modeling and mobility research of all wheel steering mobile robot[D]. Beijing: North China University of Technology, 2020.



第一作者: 槐创锋(1981—), 男, 副教授, 博士, 研究方向为机械设计、机构误差分析、机器人技术与应用等。E-mail: hcf811225@163.com。



通信作者: 金志裕(1996—), 硕士研究生, 研究方向为机器人研究与应用。E-mail: 1349926172@qq.com。