

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2022.10.016

一种新型轮毂搬运机器人的运动学分析*

余海燕, 王晓磊*, 李晓丹

(辽宁工业大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 锦州 121001)

摘要:针对目前轮胎生产线上轮毂搬运机器人成本高的问题,提出了一种由 3 自由度并联机构平台与末端夹手组成的新型轮毂搬运机器人。首先,确定了并联机构构型,建立了其坐标系;其次,采用矢量法,对并联机构进行了位置逆解分析;然后,通过 MATLAB 编程对位置逆解进行了数值计算,并利用 ADAMS 对结果进行了仿真验证;最后,运用搜索法,并结合位置逆解方程,求解出了机构的工作空间,分析了结构参数对其工作空间的影响规律;并根据机器人实际应用的工作要求,确定了并联机构的结构参数。研究结果表明:仿真输入构件长度变化曲线与理论结果一致,误差在 0.7 mm 内,验证了运动学模型的正确性;依据确定的结构参数绘制了机器人的工作空间,从工作空间形状上看,满足搬运机器人的工作要求,为搬运机器人后续动力学分析与样机制作奠定了理论基础。

关键词:搬运机器人;矢量法;结构参数;3 自由度并联机构;位置逆解分析;机构工作空间

中图分类号:TH112;TP242

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2022)10-1456-06

Kinematics analysis of a new type of wheel hub handling robot

YU Hai-yan, WANG Xiao-lei, LI Xiao-dan

(College of Mechanical Engineering and Automation, Liaoning University of Technology, Jinzhou 121001, China)

Abstract: In view of the high cost of the wheel hub handling robot in the current tire production line, a new wheel hub handling robot composed of a 3-DOF parallel mechanism platform and an end gripper was proposed. Firstly, the configuration of the parallel mechanism was determined, and the coordinate system was established. Secondly, the position inverse solution of the parallel mechanism was analyzed by the vector method. Then, the position inverse solution was numerically calculated by MATLAB programming, and the results were simulated and verified by ADAMS. Finally, the workspace of the mechanism was solved by using the search method combined with the position inverse solution equation, the influence of the structural parameters on the working space was analyzed, and the structural parameters of the parallel mechanism were determined according to the actual working requirements of the manipulator. The results show that the length variation curve of the simulated input components is consistent with the theoretical results, and the error is within 0.7 mm, which verifies the correctness of the kinematic model; the working space of the robot is drawn according to the determined structural parameters. From the perspective of the shape of the working space, it satisfies the handling robot and lays a theoretical foundation for the follow-up dynamic analysis and prototype production of the handling robot.

Key words: handling robot; vector method; structural parameters; 3-DOF parallel mechanism; position inverse solution analysis; workspace of mechanism

0 引 言

汽车是目前国内外最常见的交通工具之一,因此,汽车产品在国内外的需求量极大。而轮毂作为汽车最

主要的零件之一,其生产和用量极大。因此,要保证轮毂在生产线上被高速、可靠地搬运尤为重要。

过去,搬运作业大部分由人工完成,利用人力将待加工工件搬运至特定的位置进行加工^[1]。随着工业

收稿日期:2022-04-29

基金项目:辽宁省科学技术基金资助项目(2019-ZD-0689);辽宁省高等学校科学技术研究项目(JL201615402)

作者简介:余海燕(1997-),女,云南昭通人,硕士研究生,主要从事机器人科学与技术方面的研究。E-mail:1587926194@qq.com

通信联系人:王晓磊,男,博士,教授,硕士生导师。E-mail:wxlgy@126.com

和科技的发展,搬运机器人已经被广泛地应用于生产线上代替人工完成装卸搬运、码垛等步骤^[2]。

现阶段的轮毂搬运机器人主要以串联机器人为主,例如,国外 ABB、FANUC、KUKA 等公司,以及国内沈阳新松、哈尔滨博实等公司研制的关节式搬运机器人^[3-6]。

但采用 6 自由度串联机器人搬运轮毂,不仅占地空间大,且成本较高,容易造成资源的浪费。

与传统的串联机器人相比,并联机器人具有运动精度高、运动惯性小、机构刚性高、承载能力强、结构稳定等优点。目前,并联机器人已经被广泛应用于搬运、医疗、食品等领域中^[7,8]。

姜玉成^[9]在实验室中自行研制了一种 4-R(2SS)型四自由度并联机构,它可实现对产品的搬运和自动分拣功能。陆彩满等人^[10]提出了一种 3PUPaR 并联机构,它可实现三维移动,能实现对食品包装的抓取和装配。李虹等人^[11]提出了一种可实现二维移动和一维转动的三自由度并联机构,用于寻求并联机床最优的工作空间范围。杨毅等人^[12]提出了一种可实现三维移动的并联机构,用于满足海水采样瓶始终保持水平的采样动作。SHAO 等人^[13]提出了一种新的 3-PSR-O 型三自由度并联机构,并对其进行了工作空间分析。HUANG^[14]等人对可实现二维转动和一维移动的 3-SPR 并联机构进行了运动学分析,并确定了其参数。

基于并联机构的优点,笔者以我国轮毂生产行业为研究背景,提出一种以 2UPS-RPR 为本体的并联轮毂搬运机器人。

首先,笔者对并联机器人的构型进行分析,建立轮毂机器人的样机模型;然后,用矢量法求解并联机构运动学逆解;最后,采用搜索法求得并联机构的工作空间,确定并联机构的结构尺寸,为样机的动力学分析和样机的制作奠定基础。

1 并联机构构型分析与坐标系建立

在轮胎生产线上,轮毂搬运机器人主要负责将实现码好的轮毂搬运到生产线上。

轮毂搬运路线示意图如图 1 所示。

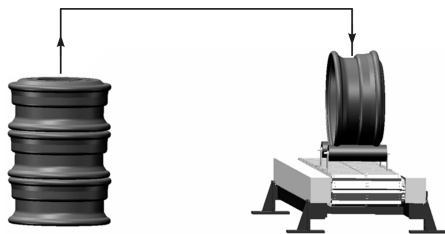


图 1 轮毂搬运路线示意图

从图 1 中可以看出:机器人搬运过程中需要将轮

毂翻转 90°,并通过 2 个方向的平移放在生产线上。因此,轮毂搬运机器人至少 2 移 1 转 3 个自由度才能将正放在地面的轮毂侧放于生产线。

能够实现 1 转 2 移 3 个自由度的并联机构较多,如 2RRR-2RPR、2UPR-UPU 等并联机构^[15,16],但实际应用较少。笔者提出采用 2UPS-RPR 并联机构作为机器人的本体实现轮毂上下料的搬运过程。

在 2UPS-RPR 并联机构中,UPS 为无约束驱动支链,RPR 支链为约束驱动支链(即提供约束又提供动力),具有 2 移 1 转 3 个自由度,因此,该机构具有 2 移 1 转 3 个自由度,还具备良好的解耦性。

由于该机构采用移动副作为驱动,有较大的移动范围,因此,其工作空间较大,适合作为搬运机械手的本体。笔者再根据轮毂的结构特点,设计手部装置。

轮毂搬运机器人样机模型如图 2 所示。

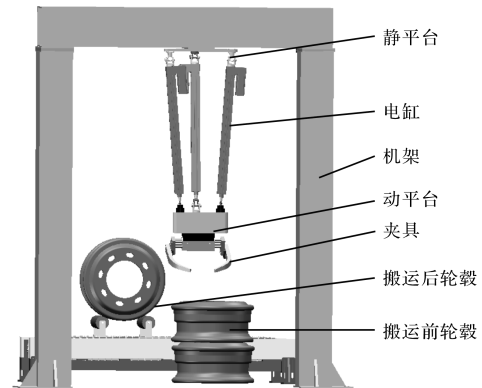


图 2 轮毂搬运机器人样机模型

2UPS-RPR 并联机构样机模型如图 3 所示。

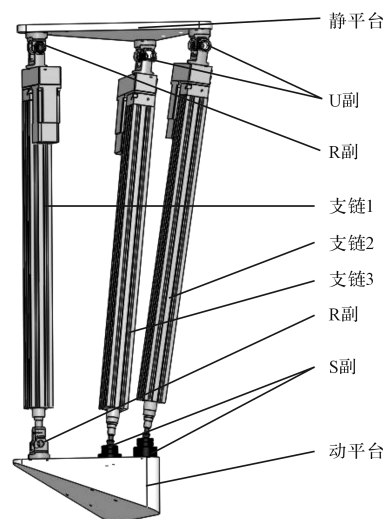


图 3 2UPS-RPR 并联机构样机模型

该并联机构由静平台、动平台以及连接两平台的 3 个支链构成,3 个支链均匀分布在平台上,且静、动平台都为等边三角形。其中,支链 1 依次由转动副(R)、移动副(P)和转动副(R)组成;支链 2 和支链 3 结构完全相同,

依次由虎克铰链(U)、移动副(P)和球副(S)组成。

如果动平台设计成平面结构,机器人翻转 90° 较为困难,因此,笔者将动平台底面设计成具有一定坡度的结构,使动平台满足工作时翻转角度要求。

并联机构坐标系的建立是进行运动学分析的前提,故笔者建立坐标系,如图 4 所示。

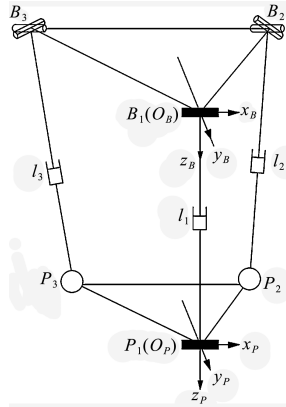


图 4 2UPS-RPR 并联机构简图

图 4 中,在静平台建立基坐标系 $O_B x_B y_B z_B$,以 O_B 为基坐标系原点, x_B 方向为静平台的 R 副轴线方向, z_B 垂直于静平台 B 竖直向下, $B_2 B_3$ 中线方向为 y_B 方向,按右手螺旋法则确定;

同理,在动平台建立动坐标系 $O_P x_P y_P z_P$,以 O_P 为坐标系原点, x_P 方向为动平台的 R 副轴线方向, z_P 竖直向下, $P_2 P_3$ 中线方向为 y_P 方向,按右手螺旋法则确定。

2 位置逆解分析

位置逆解分析是并联机器人研究的基础,因此,需要建立并联机器人的位置逆解模型。此处的并联机构位置逆解即是已知末端执行器的位姿向量 $\mathbf{X} = (x, y, z, \alpha, \beta, \gamma)^T$,需要求解各个驱动杆的驱动变量。

笔者设静平台边长为 b ,动平台边长为 p 。由建立的坐标系可得, B_1, B_2, B_3 点在基坐标系 $O_B x_B y_B z_B$ 中的位置矢量分别为:

$$\begin{cases} \mathbf{B}_1(\mathbf{O}_B) = (0, 0, 0)^T \\ \mathbf{B}_2 = \left(\frac{b}{2}, -\frac{\sqrt{3}}{2}b, 0\right)^T \\ \mathbf{B}_3 = \left(-\frac{b}{2}, -\frac{\sqrt{3}}{2}b, 0\right)^T \end{cases} \quad (1)$$

P_1, P_2, P_3 点在动坐标系 $O_P x_P y_P z_P$ 中的位置矢量分别为:

$$\begin{cases} \mathbf{P}_1(\mathbf{O}_P) = (0, 0, 0)^T \\ \mathbf{P}_2 = \left(\frac{p}{2}, -\frac{\sqrt{3}}{2}p, 0\right)^T \\ \mathbf{P}_3 = \left(-\frac{p}{2}, -\frac{\sqrt{3}}{2}p, 0\right)^T \end{cases} \quad (2)$$

设动平台参考点 O_P 在基坐标系 $O_B x_B y_B z_B$ 中的位置坐标为 $(0, y, z)^T$,姿态坐标为 $(\gamma, 0, 0)^T$ 。动坐标系与基坐标系之间关系用 Z-Y-X 型欧拉角描述,两者之间的姿态变换矩阵为 3 个绕坐标轴的旋转矩阵相乘获得。

在该设计中,根据机构的布局特点可知,动坐标系 $O_P x_P y_P z_P$ 只绕 x_P 轴旋转,故 $\alpha = 0, \beta = 0$,则旋转矩阵可以简写为:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c\gamma & -s\gamma \\ 0 & s\gamma & c\gamma \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: γ —动坐标系 $O_P x_P y_P z_P$ 绕 x_P 轴旋转的角度;且 $s\gamma = \sin\gamma, c\gamma = \cos\gamma$ 。

$P_i (i=1, 2, 3)$ 在基坐标系 $O_B x_B y_B z_B$ 中的位置矢量为:

$$\mathbf{P}_{iB} = \mathbf{R}\mathbf{P}_i + \mathbf{O}_{PB} \quad (4)$$

式中: \mathbf{R} —动坐标系 $O_P x_P y_P z_P$ 到基坐标系 $O_B x_B y_B z_B$ 的姿态变换矩阵; \mathbf{P}_{iB} —点 $P_i (i=1, 2, 3)$ 在基坐标系 $O_B x_B y_B z_B$ 中的位置坐标; \mathbf{P}_i —点 $P_i (i=1, 2, 3)$ 在动坐标系 $O_P x_P y_P z_P$ 中的位置坐标; \mathbf{O}_{PB} —点 O_P 在基坐标系 $O_B x_B y_B z_B$ 中的位置坐标。

笔者将式(2,3)代入式(4),得出点 P_1, P_2, P_3 在基坐标系 $O_B x_B y_B z_B$ 中的位置矢量为:

$$\begin{cases} \mathbf{P}_{1B} = (0, y, z)^T \\ \mathbf{P}_{2B} = \left(\frac{p}{2}, -\frac{\sqrt{3}p}{2}c\gamma + y, \frac{\sqrt{3}p}{2}s\gamma + z\right)^T \\ \mathbf{P}_{3B} = \left(-\frac{p}{2}, -\frac{\sqrt{3}p}{2}c\gamma + y, \frac{\sqrt{3}p}{2}s\gamma + z\right)^T \end{cases} \quad (5)$$

根据杆长约束条件:

$$\begin{cases} (\mathbf{P}_{1B} - \mathbf{B}_1)^T (\mathbf{P}_{1B} - \mathbf{B}_1) = l_1^2 \\ (\mathbf{P}_{2B} - \mathbf{B}_2)^T (\mathbf{P}_{2B} - \mathbf{B}_2) = l_2^2 \\ (\mathbf{P}_{3B} - \mathbf{B}_3)^T (\mathbf{P}_{3B} - \mathbf{B}_3) = l_3^2 \end{cases} \quad (6)$$

化简后可得:

$$\begin{cases} l_1 = \sqrt{y^2 + z^2} \\ l_2 = \sqrt{\left(\frac{p}{2} - \frac{b}{2}\right)^2 + \left(-\frac{\sqrt{3}p}{2}c\gamma + \frac{\sqrt{3}b}{2} + y\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{3}p}{2}s\gamma + z\right)^2} \\ l_3 = \sqrt{\left(-\frac{p}{2} + \frac{b}{2}\right)^2 + \left(-\frac{\sqrt{3}p}{2}c\gamma + \frac{\sqrt{3}b}{2} + y\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{3}p}{2}s\gamma + z\right)^2} \end{cases} \quad (7)$$

l_1, l_2, l_3 为 3 个输入构件的总长,且 $l_i = (L_i + \Delta L_i)$, L_i 为输入构件的原长, ΔL_i 为 3 个输入构件的输入长度,则并联机构 2UPS-RPR 的运动学逆解为:

$$\Delta L_i = l_i - L_i \quad (8)$$

3 仿真验证

为了验证理论分析机构位置逆解的正确性,笔者采用 MATLAB 数值求解与 ADAMS 虚拟样机仿真对比的方法,对并联机构的位置逆解模型进行验证,通过数值计算并与 ADAMS 仿真的结果比较是否一致,验证位置逆解的正确性。

设机构的结构参数为: $b = 305 \text{ mm}$, $p = 467 \text{ mm}$ 。笔者给定动平台一个运动轨迹,即:

$$\begin{cases} y = 50t \\ z = 1115 + 100\sin(\pi t/6) \quad (t = 0 \sim 3) \\ \gamma = \pi t/18 \end{cases} \quad (9)$$

利用 MATLAB 对位置分析结果进行编程,并绘制出并联机构 3 个输入构件长度随时间变化的曲线(由于输入构件 2、3 对称分布的布局特点, L_2 、 L_3 长度变化曲线完全重合)。

输入构件长度随时间变曲线如图 5 所示。

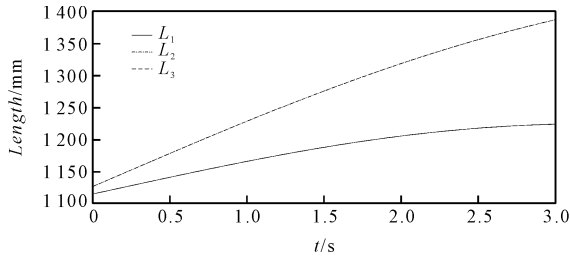


图 5 输入构件长度随时间变曲线

笔者将并联机构的三维模型导入 ADAMS 软件,添加运动副以及约束关系,在动平台参考点引入式(9)的末端运动轨迹,对位置逆解进行仿真,得到仿真结果,即并联机构输入构件长度随时间变化的曲线,如图 6 所示。

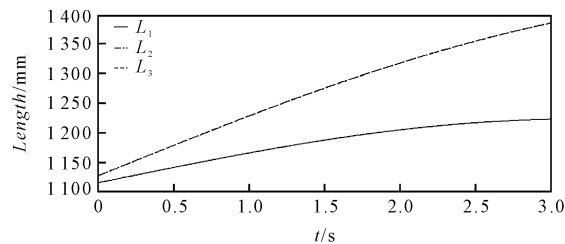


图 6 输入构件长度随时间变化曲线

笔者将 MATLAB 理论计算与 ADAMS 虚拟样机仿真所得到的输入构件长度进行对比。

理论计算与仿真结果绝对误差曲线如图 7 所示。

由图 7 可知:理论计算与仿真结果绝对误差在 0.7 mm 以内,理论数值求解与样机仿真结果基本一致,验证了并联机构运动学模型的正确性。

产生误差的主要原因为:三维模型在导入 ADAMS

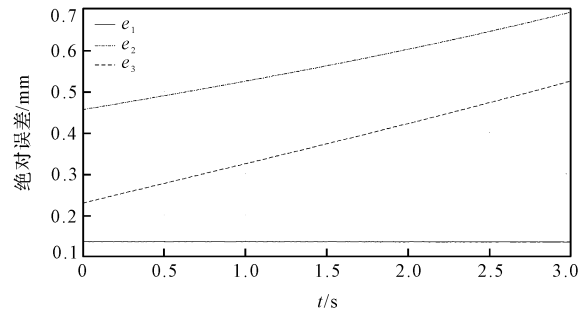


图 7 理论计算与仿真结果绝对误差

软件时,坐标存在误差, MATLAB 软件与 ADAMS 软件之间的精度也存在误差。

4 工作空间分析与结构参数确定

4.1 工作空间分析

并联机构工作空间是机构运动平台的工作区域,它是衡量并联机构性能的重要指标^[17]。在轮毂搬运时,沿 y 轴、 z 轴方向的平移是该机构运动性能的主要体现,因此,笔者主要研究并联机构的定姿态工作空间,即给定运动平台姿态角,求运动平台参考点的可达范围。

利用搜索法确定工作空间时,需要确定机构的约束条件。根据 2UPS-RPR 并联机构的布局特点可知,该机构定姿态工作空间约束条件包括杆长约束和转动副转角约束。

(1) 杆长约束。

每个杆件必须满足条件:

$$l_{\min} \leq l_i \leq l_{\max} \quad (i = 1, 2, 3) \quad (10)$$

(2) 运动副转角约束。

设联接分支驱动杆和上平台的转动副为 $R1$,联接分支驱动杆与下平台的转动副为 $R2$ 。设分支驱动杆 1 相对于坐标系的姿态向量为 l_1 ,转动副 Ri 轴线的单位法向量为 n_{Ri} 。

则转动副转角的约束条件为:

$$\theta_{\min} \leq \arccos \frac{l_1 \cdot n_{Ri}}{|l_1|} \leq \theta_{\max} \quad (11)$$

设置机构的结构参数为:

$b = 467 \text{ mm}$, $p = 305 \text{ mm}$, $750 \text{ mm} \leq l_i \leq 1500 \text{ mm}$ ($i = 1, 2, 3$),转动副转角范围为 $-\pi/4 \leq \theta_{Ri} \leq \pi/4$,动平台的姿态角为 $\gamma = 0$ 。

结合机构位置逆解,笔者采用搜索法,利用 MATLAB 编程绘制出机构的定姿态工作空间,即在给定姿态下动平台参考点可以到达的所有点的集合。

机构的定姿态工作空间形状如图 8 所示。

从图 8 中可以看出:该机构具有较大的定姿态工作空间,参考点 O_p 的运动轨迹始终位于一个平面内,

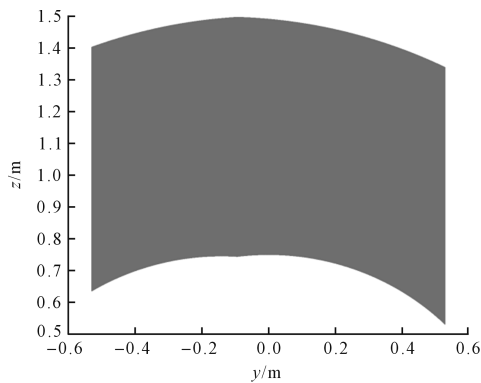


图 8 机构的定姿态工作空间

呈曲面;运动空间过渡平滑,在内部不存在空缺。

由于结构的对称性,该工作空间也具有良好的对称性,适合用于搬运场合。

4.2 结构参数对机构定姿态工作空间的影响

根据工作空间的数值解,笔者把所有满足条件的数值解作为“点集”,则工作空间体积计算公式为^{[18]60-61}:

$$V = length(x) \cdot \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z \quad (12)$$

式中: V —工作空间体积; $length(x)$ —“点集”数量; $\Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z$ —参数变量步长。

“点集”中的一个点代表工作空间的一个微元,即所有微元之和为工作空间的体积。

在该设计中,运动平台具有两个移动和一个转动自由度,参考点 O_p 的运动轨迹始终位于一个平面内,工作空间降维。

因此,衡量该机构的工作空间大小变为面积,则工作空间面积计算公式为^{[18]66-68}:

$$V = length(y) \cdot \Delta y \cdot \Delta z \quad (13)$$

对于该机构而言,影响机构定姿态工作空间的结构参数有驱动杆长和静动平台尺寸。采用单变量分析法,定量研究各个结构参数对该机构定姿态工作空间面积大小的影响。

笔者取静、动平台边长 $b = 467 \text{ mm}$, $p = 305 \text{ mm}$,转动副的最大转角为 45° ,杆长最小值不变时,工作空间面积随杆长最大值的变化曲线,即杆长最大值对定姿态工作空间的影响情况,如图 9 所示。

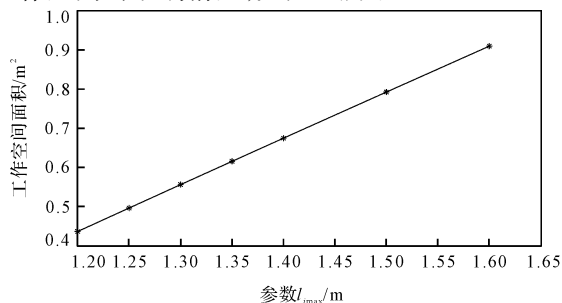


图 9 杆长最大值对定姿态工作空间的影响

笔者取静、动平台边长 $b = 467 \text{ mm}$, $p = 305 \text{ mm}$,转动副的最大转角为 45° ,杆长最大值不变时,工作空间面积随杆长最小值的变化曲线,即杆长最小值对定姿态工作空间的影响情况,如图 10 所示。

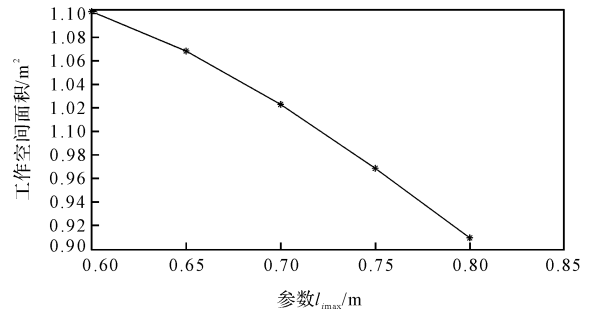


图 10 杆长最小值对定姿态工作空间的影响

笔者取转动副的最大转角为 45° ,杆长最小值与最大值均保持不变,工作空间面积随静、动平台边长比值的变化曲线,即静平台与动平台边长比值对定姿态工作空间的影响情况,如图 11 所示。

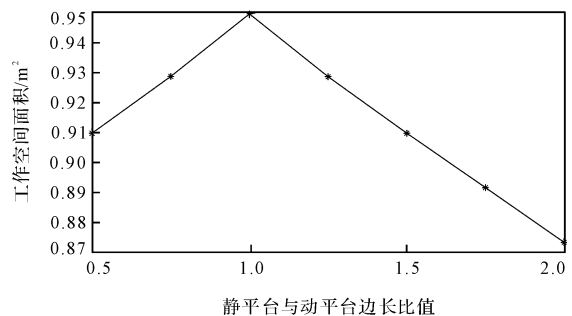


图 11 静平台与动平台边长比值对定姿态工作空间的影响

综合图(9~11)可以发现:驱动杆 l_1 、 l_2 、 l_3 的行程范围和静、动平台边长比值对该机构的定姿态工作空间的影响很大;机构的定姿态工作空间随着驱动杆行程的增加而增加,且在静、动平台边长比值趋于 1 时,得到更大的工作空间。

因此,可增加驱动杆的行程范围,或者使静、动平台边长比值趋于 1,可使得该机构的工作空间面积大幅度提升。

4.3 结构参数确定

在实际生产线中,要求轮毂搬运机器人 y 轴方向行程为 1 m , z 轴方向行程为 0.8 m 。根据前文分析,在不考虑杆长变化的前提下,静、动平台边长相等时,并联机构的位置工作空间取得最大值。根据机器人末端夹具的安装空间,取静、动平台边长 $b = p = 305 \text{ mm}$ 。同时,根据 y 、 z 轴的运动范围,取驱动杆的行程范围为 $0.8 \text{ m} \sim 1.6 \text{ m}$ 。

根据确定的结构尺寸,笔者绘制的机构工作空间如图 12 所示。

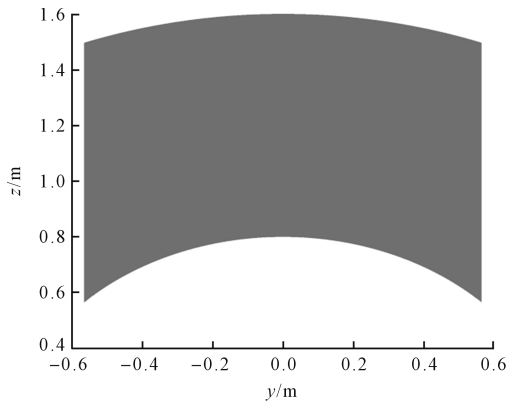


图 12 确定参数后机构的定姿态工作空间

图 12 中: y 方向范围为 $-0.5657\text{ m} \sim 0.5657\text{ m}$, 行程约为 1.13 m ; z 方向范围为 $0.5657\text{ m} \sim 1.6\text{ m}$, 行程约为 1.03 m 。

由此可见,该机构能够满足轮毂搬运的工作要求。

5 结束语

针对目前轮胎生产线上轮毂搬运成本高的问题,笔者提出了一种新型搬运机器人,确定了机器人的构型,设计了机器人的样机模型,推导了机器人并联机构的逆解,并进行了验证,求解了并联机构的工作空间以及结构参数,对其工作空间的影响规律,确定了其结构参数。

研究结论如下:

(1) 采用矢量法建立了 2UPS-RPR 并联机构逆解模型;通过 MATLAB 编程对位置逆解进行了数值计算,并利用 ADAMS 仿真对逆解模型进行了验证,结果表明:仿真输入构件长度变化曲线与理论结果一致,误差在 0.7 mm 内,验证了机构运动学模型的正确性;

(2) 运用搜索法并结合位置逆解方程,求解出了并联机构的工作空间;

(3) 通过分析得到了结构参数对工作空间的影响规律,结合机器人实际应用中的工作要求,确定了并联机构的结构参数。

在上述研究成果的基础上,在后续的研究中,笔者将对轮毂搬运机器人进行运动性能分析、动力学分析,并且制作样机。

参考文献 (References):

[1] 陈 汕,李兴和,谭泽华,等. 四自由度码垛机器人设计及其应用[J]. 机电工程技术,2021,50(3):164-166.

- [2] 高昕葳. 工业机器人在智能制造中的应用浅析[J]. 内燃机与配件,2021(20):199-200.
- [3] NUBIOLA A, ABONEV I. Absolute calibration of an ABB IRB 1600 robot using a laser tracker[J]. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, 2013, 29 (1): 236-245.
- [4] 刘凤臣,姚赞峰,刘黎明,等. 高速搬运机器人产业应用及发展[J]. 轻工机械,2012,30(2):108-112.
- [5] MOGHADDAM M, NOF S. Y. Parallelism of Pick-and-Place operations by multi-gripper robotic arms[J]. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, 2016 (42): 135-146.
- [6] FANG Y F, TSAI L W. Structure synthesis of a class of 4-DoF and 5-DOF parallel manipulators with identical limb structures [J]. **International Journal of Robotics Research**,2002,21(9):799-810.
- [7] CHOI H, KONNO A, UCHIYAMA M. Closed-form forward kinematics solutions of a 4-DOF parallel robot [J]. **International Journal of Control Automation & Systems**,2009,7(5):858-864.
- [8] 陈修龙,盛永超. 高速抓取并联机器人实验平台运动学建模与分析[J]. 实验室研究与探索,2021,40(1):101-106.
- [9] 姜玉成. 四自由度高速并联机器人机构特性分析与动力学研究[D]. 大连:大连理工大学机械工程学院,2012:5-10.
- [10] 陆彩满,刘艳梨,古 亮,等. 新型 3PUPaR 并联机构运动学分析与多目标优化[J]. 包装工程,2020,41(23):179-186.
- [11] 李 虹,王新宇,胡 洋,等. 含闭环球铰的三自由度并联机构工作空间分析[J]. 包装工程,2020,41(21):202-207.
- [12] 杨 毅,孙 健,彭 艳,等. 一种轻型三自由度平移运动并联机构[P]. 中国:CN107618023B,2020-11-24.
- [13] SHAO Jie-jie, CHEN Wen-yu, FU Xin. Position, singularity and workspace analysis of 3-PSR-O spatial parallel manipulator[J]. **Chinese Journal of Mechanical Engineering**,2015,28(3):437-450.
- [14] HUANG Peng, WANG Jin-song, WANG Li-ping, et al. Dimensional synthesis for 3-PRS mechanism based on identifiability performance [J]. **Chinese Journal of Mechanical Engineering**,2012,25(2):234-240.
- [15] 沈惠平,朱忠顺,邓嘉鸣. 一种零耦合度且正向位置解析和运动解耦的两平移一转动并联机构[P]. 中国:CN111216107A,2020-06-02.
- [16] 孔宪文,戈斯林. 并联机构构型综合[M]. 北京:机械工业出版社,2013.
- [17] MERLET J P, GOSSELIN CM, MOULY N. Workspace of planar parallel manipulators[J]. **Mechanism & Machine Theory**,1998,33(1):7-20.
- [18] 季 晔. 少自由度并联机器人机构而分析方法研究[M]. 成都:西南交通大学出版社,2017.

[编辑:司红岩]

本文引用格式:

余海燕,王晓磊,李晓丹. 一种新型轮毂搬运机器人的运动学分析[J]. 机电工程,2022,39(10):1456-1461.

YU Hai-yan, WANG Xiao-lei, LI Xiao-dan. Kinematics analysis of a new type of wheel hub handling robot[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2022,39(10):1456-1461.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>