

三自由度并联分拣机器人的动力学建模与仿真

崔冰艳, 桂小庚, 曾鸿泰, 李贺

(华北理工大学 机械工程学院, 河北 唐山 063000)

摘要: **目的** 针对自动化生产线上分拣机器人的动力可控性问题, 提出一种 2UU-UPU 三自由度并联分拣机器人, 以提高分拣的精度可控性。**方法** 分析该机器人的机构自由度, 以及各参数之间的关系, 基于闭环矢量法建立并联机构的运动学逆解模型; 利用拉格朗日动力学方程推导该机器人的动力学表达式, 并进行数值计算, 采用 Matlab Simulink 和 Adams 进行动力学联合仿真, 对理论值和仿真值进行误差分析。**结果** 揭示了该机器人动平台的运动规律, 得到了驱动力矩曲线, 理论值与仿真值的误差较小, 3 个驱动力矩的最大误差分别为 0.379%、0.283%、0.146%。**结论** 通过验证可知, 该机构具有较好的动力学特性, 这为后续电机的选型和精准控制奠定了基础。

关键词: 2UU-UPU 并联机构; 分拣机器人; 动力学; 分拣精度

中图分类号: TH112 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3563(2024)03-0218-08

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2024.03.025

Dynamic Modeling and Simulation of a 3-DOF Parallel Sorting Robot

CUI Bingyan, GUI Xiaogeng, ZENG Hongtai, LI He

(College of Mechanical Engineering, North China University of Science and Technology, Hebei Tangshan 063000, China)

ABSTRACT: Aiming at the dynamic controllability of sorting robots in automatic production lines, the work aims to propose a 2UU-UPU 3-DOF parallel sorting robot to improve the accuracy and controllability of sorting. The relationship between the degrees of freedom and various parameters of the robot was analyzed, and an inverse kinematics model of the parallel mechanism was established based on closed-loop vector method. The dynamics expression of the robot was derived using Lagrange dynamics equations, and numerical calculations were performed. The dynamic joint simulation of the robot was performed using Matlab Simulink and Adams, and the error analysis of the theoretical and simulation values was performed. The motion law of the robot's moving platform was revealed, and the driving moment curves were obtained. The error between the theoretical value and the simulation value was small, with the maximum error of the three driving torques being 0.379%, 0.283%, and 0.146%, respectively. It is verified that the mechanism has good dynamic characteristics, laying a foundation for the subsequent motor selection and precise control.

KEY WORDS: 2UU-UPU parallel mechanism; sorting robot; dynamics; sorting accuracy

随着生产线的智能化发展, 产品的分拣已进入一个新阶段, 特别是分拣机器人的研发, 为生产线上的产品分拣注入了新的活力。并联机器人在强度、精度等方面弥补了串联机器人的不足, 既具有较好的操作

灵活性, 又能够保证高精度控制的动力学特性^[1-3]。刘娟等^[4]提出了一种 1R2T 并联机构, 并对该机构进行了运动学逆解分析及工作空间描述, 分析了该机构的合理性。卜政伟等^[5]提出一种具有三自由度的

收稿日期: 2023-03-27

基金项目: 国家青年科学基金 (E51505124); 河北省自然科学基金 (E2017209252); 河北省高等学校科学技术研究重点项目 (ZD2020151); 唐山市机器人机构学理论基础创新团队项目 (21130208D); 唐山市基础研究项目 (23130201E); 华北理工大学重点科研项目 (ZD-YG-202306-23); 华北理工大学专业学位综合改革项目 (ZD18010223-03)

2PRC-PCR 并联机构, 基于几何法和空间位置矢量法推导出该机构的正、逆运动学模型, 并利用 ADAMS 软件验证了运动学模型的正确性。

动力学研究是实现并联机器人精准控制的重要内容, 常见的动力学研究方法包括牛顿-欧拉法^[6-7]、拉格朗日法^[8-9]、约束螺旋理论^[10]、虚功原理^[11-12]等。Wang 等^[13]利用虚功原理对 2UPU-SP 材料加工混合机器人进行了动力学建模, 并提出考虑重力的动态性能指标。董旭等^[14]为了提高并联包装机构的动态性能, 应用凯恩方程对机构进行了动力学建模。拉格朗日法基于能量角度, 无须计算各杆件之间的内力, 其求解形式较简单。杨应洪等^[15]提出了一种 2RPS-RPU 并联机构, 利用拉格朗日方法推导出机构的动力学模型, 并利用 Matlab 对系统运动学和动力学进行了数值仿真, 总结出该机构的基本运动规律和力学性能。

基于并联分拣机器人特有的运动性能和动力学特性, 需要保证运动平稳和控制精度高, 以完成分拣包装任务。文中以 2UU-UPU 并联机器人作为研究对象, 得到该机构的运动学逆解和动力学方程, 并通过 Matlab 软件和 Adams 软件联合仿真, 得到驱动力矩曲线和驱动关节加速度曲线, 对比仿真与计算的结果, 验证动力学模型的正确性, 为后续机构的精准控制奠定基础。

1 并联机构描述与位姿分析

1.1 2UU-UPU 并联机构构型

空间 2UU-UPU 并联机构模型如图 1 所示, 它由动平台、静平台, 以及 3 条支链组成。其中, 支链 1 由连接动、静平台的 2 个虎克铰链 (U 副) 及移动副

(P 副) 组成, 支链 2 和支链 3 通过 2 个虎克铰链 (U 副) 连接动、静平台。

静、动平台为等边三角形。将静坐标系 $O-xyz$ 的原点设在静平台的几何中心, x 轴指向静平台的 B_1 点, z 轴垂直于静平台向上, y 轴由右手定则确定。将动坐标系 $P-xyz$ 设在动平台的几何中心, x 轴指向动平台的 P_1 点, z 轴垂直于动平台向上, y 轴由右手定则确定。 P_1C_1 的长为 l_5 , C_1B_1 的长为 l_4 , P_2B_2 的长为 l_2 , P_3B_3 的长为 l_3 。定义静平台的外接圆半径为 r , 动平台的外接圆半径为 R 。

1.2 位姿分析

静平台 U 副中心点 B_1 、 B_2 、 B_3 的坐标在静坐标系 $O-xyz$ 中的表达分别为 $[r \ 0 \ 0]^T$ 、 $[-r/2 \ \sqrt{3}r/2 \ 0]^T$ 、 $[-r/2 \ -\sqrt{3}r/2 \ 0]^T$ 。同理, 在动坐标系 $P-xyz$ 下, 动平台上 U 副中心 P_1 、 P_2 、 P_3 的坐标分别表示为 $[R \ 0 \ 0]^T$ 、 $[-R/2 \ \sqrt{3}R/2 \ 0]^T$ 、 $[-R/2 \ -\sqrt{3}R/2 \ 0]^T$ 。设动坐标系到静坐标系的旋转矩阵为 T , 见式 (1)。

$$T = \begin{bmatrix} n_i & o_i & a_i & x_p \\ n_j & o_j & a_j & y_p \\ n_k & o_k & a_k & z_p \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: n_m 、 o_m 、 a_m ($m=i, j, k$) 为动坐标系 $P-xyz$ 中 x 、 y 、 z 轴的 3 个单位相对于静平台坐标系 $O-xyz$ 的方向余弦; $[x_p \ y_p \ z_p]^T$ 为 P 点在静坐标系 $O-xyz$ 下的位置矢量。在静坐标系下, 动平台 U 副中心处 P_i 点的坐标可表示为式 (2)。

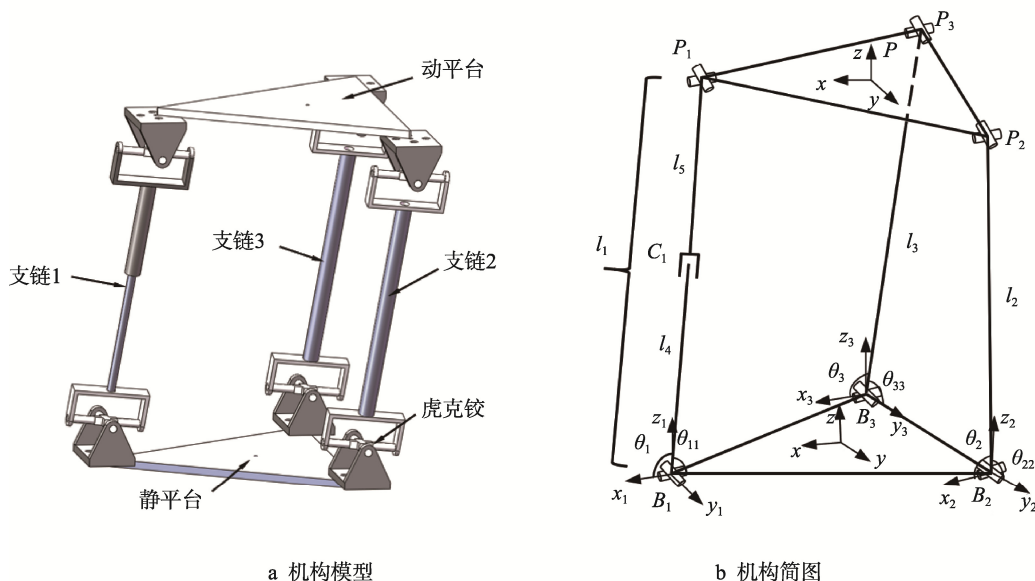


图 1 2UU-UPU 并联机构模型与简图

Fig.1 Model and schematic diagram of 2UU-UPU parallel mechanism

$$\begin{bmatrix} P_i \\ 1 \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} p_i \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: P_i 、 p_i 分别表示动平台 U 副中心点 p_1 、 p_2 、 p_3 在静平台坐标系 $O-xyz$ 和动平台坐标系 $P-xyz$ 下的位置向量。

由于该机构的 2 条 UU 支链的 U 副分别受到相互垂直的转动约束, 因此该并联机构的动平台 U 副中心点 P_i 的运动轨迹分别位于如下的垂直平面内, 见式 (3)。

$$\begin{cases} X_1 = 0 \\ Y_2 = 0 \\ Y_3 = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: X_1 为支链 1 的 xOz 平面; Y_2 为支链 2 的 yOz 平面; Y_3 为支链 3 的 yOz 平面。联立式 (1) ~ (3), 并化简, 可得到该并联机构的 3 个约束方程, 见式 (4)。

$$\begin{cases} x_p = -n_i R \\ o_i = \sqrt{3} n_i \\ y_p = R(n_j + \sqrt{3} o_j) / 2 \end{cases} \quad (4)$$

用 z - y - x 欧拉角表示动平台 $P_1P_2P_3$ 的姿态, 则式 (1) 可表示为式 (5)。

$$T = \begin{bmatrix} c\alpha c\beta & c\alpha s\beta s\gamma - s\alpha c\gamma & c\alpha s\beta c\gamma + s\alpha s\gamma & x_p \\ s\alpha c\beta & s\alpha s\beta s\gamma + c\alpha c\gamma & s\alpha s\beta c\gamma - c\alpha s\gamma & y_p \\ -s\beta & c\beta s\gamma & c\beta c\gamma & z_p \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: $c\alpha$ 、 $c\beta$ 、 $c\gamma$ 分别表示 α 、 β 、 γ 的余弦; $s\alpha$ 、 $s\beta$ 、 $s\gamma$ 分别表示 α 、 β 、 γ 的正弦。

联立式 (4) 和式 (5), 得到该并联机构位姿变量之间的关系, 见式 (6)。

$$\begin{cases} x_p = -R s\alpha c\beta \\ y_p = R(s\alpha s\beta s\gamma + \sqrt{3} c\alpha c\gamma - \sqrt{3} c\alpha c\beta) \\ \alpha = \arccos[s\alpha c\gamma / (s\beta - \sqrt{3} c\beta)] \end{cases} \quad (6)$$

分析式 (6), 可得到以下结论: z_p 是一个独立的变量, 与其他 5 个参量无关; 机构具有 1 个移动自由度和 2 个转动自由度, 共 3 个自由度; 当 $\alpha=0$ 或 $\beta=90^\circ$ 时, $x_p=0$ 。在此基础上, 利用修正的 K-G 公式对自由度进行验证, 见式 (7)。

$$F = d(n - g - 1) + \sum_i f_i + v - \zeta = 3 \quad (7)$$

式中: F 为机构的自由度; d 为机构阶数, 有一个公共约束, 所以 $d=5$; n 为构件数 (包含机架), $n=6$; g 为运动副总数, $g=7$; f_i 为第 i 个运动副的自由度数。在无并联冗余约束时, $v=0$ 。在无局部自由度时, $\zeta=0$ 。由 K-G 公式计算出的自由度数与位姿分析出的自由度数相等, 验证了位姿分析的准确性。

2 运动学逆解

在 2UU-UPU 并联机构中, 设置轴线 OB_i 与 Ox 的夹角为 θ_{0i} ($i=1, 2, 3$), 轴线 B_iP_i 与静平台 U 副中心点支链坐标系 y 轴的夹角为 θ_{ii} , 点 P_i 在动坐标系 $P-xyz$ 中的坐标为 $(x_{P_i}, y_{P_i}, z_{P_i})^T$, P_i 点坐标在静坐标系 $O-xyz$ 的 2 种表示形式下的结果应相等, 其等式见式 (8), 等式左边为根据杆长关系表示的 P_i 点坐标, 等式右边为利用 z - y - x 欧拉角表示的 P_i 点坐标。该并联机构的运动学逆解公式可表示为式 (9)。 θ_{ii} 与 θ_i 之间的关系可由等式 (10) 表示。

$$\begin{cases} l_i c\theta_i + r c\theta_{0i} = x_p + x_{P_i} c\alpha c\beta + y_{P_i} (s\alpha c\gamma - c\alpha s\beta s\gamma) \\ l_i s\theta_{ii} + r s\theta_{0i} = y_p + x_{P_i} s\alpha c\beta + y_{P_i} (c\alpha c\gamma + s\alpha s\beta s\gamma) \\ l_i s\theta_i s\theta_{ii} = z_p - x_{P_i} s\beta + y_{P_i} c\beta s\gamma \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} \theta_1 = \arcsin \frac{z_p - x_{P_1} s\beta + y_{P_1} c\beta s\gamma}{l_1 s\theta_{11}} \\ \theta_2 = \arccos \frac{(x_p + x_{P_2} c\alpha c\beta + y_{P_2} (s\alpha c\gamma - c\alpha s\beta s\gamma) - r c\theta_{02})}{l_2} \\ \theta_3 = \arccos \frac{(x_p + x_{P_3} c\alpha c\beta + y_{P_3} (s\alpha c\gamma - c\alpha s\beta s\gamma) - r c\theta_{03})}{l_3} \end{cases} \quad (9)$$

$$(l_i \cos \theta_i)^2 + (l_i \cos \theta_{ii})^2 + (l_i \sin \theta_i \sin \theta_{ii})^2 = l_i^2 \quad (10)$$

在静平台坐标系 $O-xyz$ 下, 设支链 B_iP_i 的质心坐标为 $(x_{ic}, y_{ic}, z_{ic})^T$, 把参量 θ_{11} 、 θ_{22} 、 θ_{33} 作为系统参量 θ_1 、 θ_2 、 θ_3 的函数, 将支链的质心坐标左右两端分别对时间 t 求导得到式 (11)。

$$\begin{cases} \dot{x}_{ic} = -\frac{1}{2} l_i \dot{\theta}_i \sin \theta_i \\ \dot{y}_{ic} = -\frac{1}{2} l_i \dot{\theta}_{ii} \sin \theta_{ii} \\ \dot{z}_{ic} = \frac{1}{2} l_i (\dot{\theta}_i \cos \theta_i \sin \theta_{ii} + \dot{\theta}_{ii} \sin \theta_i \cos \theta_{ii}) \end{cases} \quad (11)$$

$$\text{式中: } \dot{\theta}_{ii} = \frac{\partial \theta_{ii}}{\partial \theta_1} \dot{\theta}_1 + \frac{\partial \theta_{ii}}{\partial \theta_2} \dot{\theta}_2 + \frac{\partial \theta_{ii}}{\partial \theta_3} \dot{\theta}_3 \quad (i=1, 2, 3)。$$

3 动力学分析

通过动力学方程研究机构的关节变量与执行器驱动力或者驱动力矩之间的关系, 利用拉格朗日方法, 从能量的角度对机构进行动力学分析, 避免了一些数学计算。拉格朗日方程见式 (12)。

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial M}{\partial \dot{\theta}_i} \right) - \frac{\partial M}{\partial \theta_i} + \frac{\partial V}{\partial \theta_i} = \tau_i \quad (12)$$

设构件 B_iP_i ($i=1, 2, 3$) 的质心 c 速度 $v_i = (\dot{x}_{ic}, \dot{y}_{ic}, \dot{z}_{ic})^T$, 构件质量为 m_i , 绕质心的转动惯量

为 J_i 。设动平台的质量为 m_0 , 动平台相对于动平台坐标系 $P\text{-}xyz$ 的惯性矩阵为 I_p (主转动惯量分别为 J_x 、 J_y 、 J_z), 动平台质心 P 点处的速度和角速度分别为 $v_p = (\dot{x}_p, \dot{y}_p, \dot{z}_p)^T$ 、 $\omega_p = (\dot{\gamma}, \dot{\beta}, \dot{\alpha})$, 并取平面 $O\text{-}xy$ 为零势能面。运动副之间的摩擦及能量损失不计, 则系统的动能可表示为式 (13), 系统的势能见式 (14)。

$$M = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 [m_i (\dot{x}_{ic}^2 + \dot{y}_{ic}^2 + \dot{z}_{ic}^2) + J_i (\dot{\theta}_i^2 + \dot{\theta}_{ii}^2)] + \frac{1}{2} [m_0 (\dot{x}_p^2 + \dot{y}_p^2 + \dot{z}_p^2) + J_x \dot{\alpha}^2 + J_y \dot{\beta}^2 + J_z \dot{\gamma}^2] = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 [m_i (\dot{x}_{ic}^2 + \dot{y}_{ic}^2 + \dot{z}_{ic}^2) + J_i (\dot{\theta}_i^2 + \dot{\theta}_{ii}^2)] + \frac{1}{2} (m_0 v_p^T v_p + \omega_p^T I_p \omega_p) = \frac{1}{2} (\hat{J}_{11} \dot{\theta}_1^2 + \hat{J}_{22} \dot{\theta}_2^2 + \hat{J}_{33} \dot{\theta}_3^2) + \hat{J}_{12} \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \hat{J}_{13} \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3 + \hat{J}_{23} \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3 \quad (13)$$

$$V = \sum_{i=1}^3 m_i g z_i + m_0 g z_p \quad (14)$$

将式 (13) 和式 (14) 求导, 并化简, 可得式 (15)。

$$\left\{ \begin{aligned} \tau_1 &= \hat{J}_{11} \ddot{\theta}_1 + \hat{J}_{12} \ddot{\theta}_2 + \hat{J}_{13} \ddot{\theta}_3 + \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial \hat{J}_{11}}{\partial \theta_1} \dot{\theta}_1^2 + \frac{\partial V}{\partial \theta_1} + \\ &\quad \left(\frac{\partial \hat{J}_{12}}{\partial \theta_2} - \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial \hat{J}_{22}}{\partial \theta_1} \right) \dot{\theta}_2^2 + \frac{\partial \hat{J}_{11}}{\partial \theta_2} \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \frac{\partial \hat{J}_{11}}{\partial \theta_3} \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3 + \\ &\quad \left(\frac{\partial \hat{J}_{13}}{\partial \theta_3} - \frac{\partial \hat{J}_{33}}{2 \partial \theta_1} \right) \dot{\theta}_3^2 + \left(\frac{\partial \hat{J}_{12}}{\partial \theta_3} + \frac{\partial \hat{J}_{13}}{\partial \theta_2} - \frac{\partial \hat{J}_{23}}{\partial \theta_1} \right) \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3 \\ \tau_2 &= \hat{J}_{22} \ddot{\theta}_1 + \hat{J}_{12} \ddot{\theta}_2 + \hat{J}_{23} \ddot{\theta}_3 + \frac{\partial V}{\partial \theta_2} + \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial \hat{J}_{22}}{\partial \theta_2} \dot{\theta}_2^2 + \\ &\quad \left(\frac{\partial \hat{J}_{12}}{\partial \theta_1} - \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial \hat{J}_{11}}{\partial \theta_2} \right) \dot{\theta}_1^2 + \frac{\partial \hat{J}_{23}}{\partial \theta_3} \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3 + \frac{\partial \hat{J}_{22}}{\partial \theta_1} \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \\ &\quad \left(\frac{\partial \hat{J}_{23}}{\partial \theta_3} - \frac{\partial \hat{J}_{33}}{2 \partial \theta_2} \right) \dot{\theta}_3^2 + \left(\frac{\partial \hat{J}_{12}}{\partial \theta_3} + \frac{\partial \hat{J}_{23}}{\partial \theta_1} - \frac{\partial \hat{J}_{13}}{\partial \theta_2} \right) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3 \\ \tau_3 &= \hat{J}_{33} \ddot{\theta}_1 + \hat{J}_{13} \ddot{\theta}_2 + \hat{J}_{23} \ddot{\theta}_3 + \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial \hat{J}_{33}}{\partial \theta_3} \dot{\theta}_3^2 + \frac{\partial V}{\partial \theta_3} + \\ &\quad \left(\frac{\partial \hat{J}_{13}}{\partial \theta_1} - \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial \hat{J}_{11}}{\partial \theta_3} \right) \dot{\theta}_1^2 + \frac{\partial \hat{J}_{33}}{\partial \theta_1} \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3 + \frac{\partial \hat{J}_{33}}{\partial \theta_2} \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3 + \\ &\quad \left(\frac{\partial \hat{J}_{23}}{\partial \theta_2} - \frac{\partial \hat{J}_{22}}{2 \partial \theta_3} \right) \dot{\theta}_2^2 + \left(\frac{\partial \hat{J}_{13}}{\partial \theta_2} + \frac{\partial \hat{J}_{23}}{\partial \theta_1} - \frac{\partial \hat{J}_{12}}{\partial \theta_3} \right) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \end{aligned} \right. \quad (15)$$

式中, τ_1 、 τ_2 、 τ_3 为系统驱动的广义力。

4 工程应用实例及逆运动学仿真

2UU-UPU 并联机构在生产线上的分拣示意图如图 2 所示。利用 SolidWorks 软件完成分拣模型的建模后, 在生产线上对机构进行分拣仿真。机械爪在生产线上抓住货物, 按照一定轨迹将其投放到分拣平台上, 然后返回抓取下一个货物。仿真结果显示,

2UU-UPU 并联机构能顺利完成指定的分拣工序, 且运行平稳, 具有良好的运动性能。由此可知, 2UU-UPU 并联机构借助其灵活的自由度可完成流水线上的分拣工作, 满足多数货物的分拣需要, 在分拣流水线上具有很好的工程应用价值。

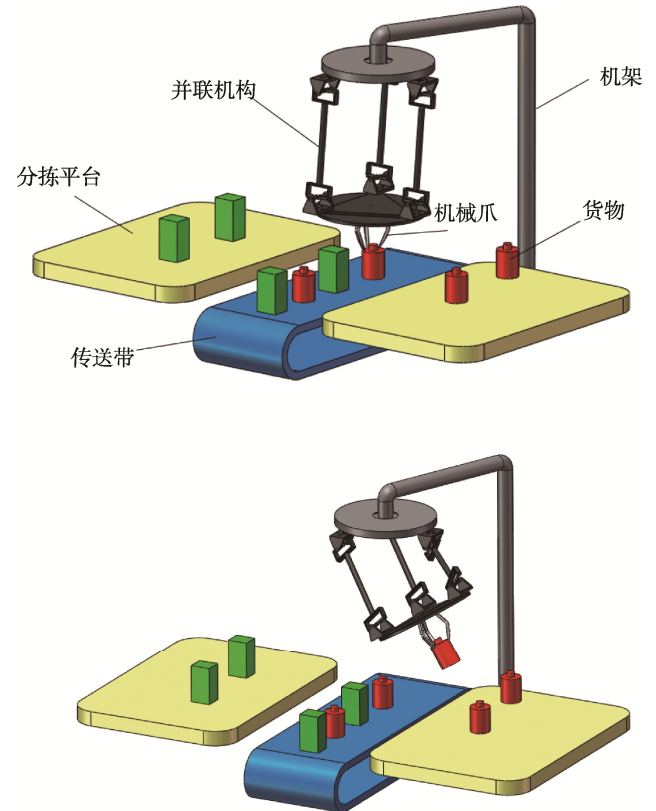


图 2 2UU-UPU 并联机构在分拣流水线上的应用

Fig.2 Application of 2UU-UPU parallel mechanism in sorting line

根据仿真时机械爪的运动轨迹, 预设一段具有 2 个周期且不完全重合的动平台质心的运动轨迹。在获取动平台质心运动轨迹时, 首先在 SolidWorks 软件中记下机械爪中心点的初始位置坐标, 然后模拟生产线分拣过程, 缓慢调整机械爪位姿, 并依次记下中心点的位置坐标, 最后绘制出各点, 并拟合, 得到的运动轨迹图如图 3 所示。在 Matlab 中绘制出机构的简要模型, 使并联机器人的质心按照设定的轨迹进行运动, 设置仿真步长为 0.01 s, 仿真计算时间为 30 s。机器人动平台在无负载的条件下运动的起始点坐标为 $[174.279 \ -5.609 \ 27.328]^T$, 终止点坐标为 $[156.900 \ -40.648 \ 44.699]^T$ 。利用 Matlab 工具箱, 可求得并联机器人动平台的转动角度和位移距离, 如图 4 所示。图 4 中的 3 条曲线分别为 γ 、 β 曲线和 x 方向位移曲线。

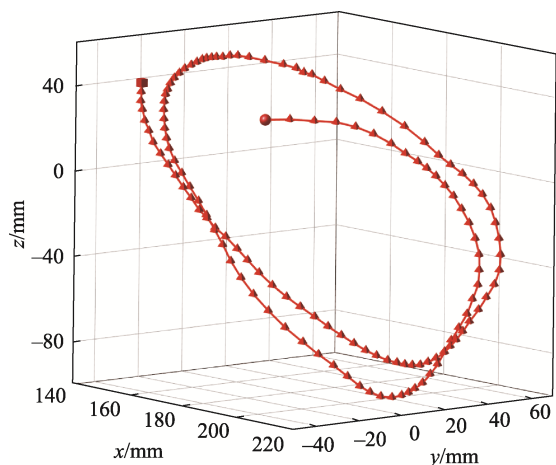


图3 动平台质心运动轨迹
Fig.3 Motion trajectory of the moving platform centroid

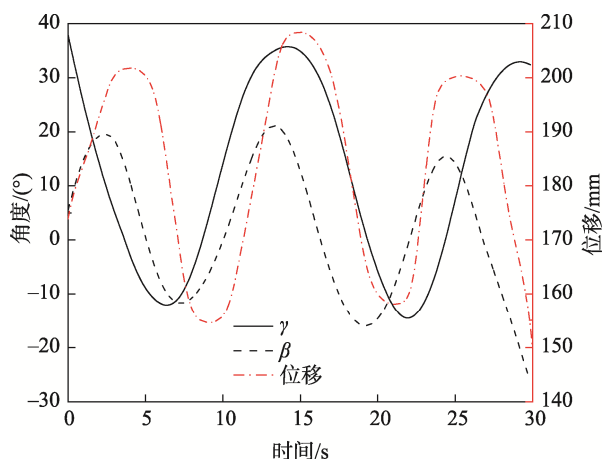


图4 位姿参数曲线
Fig.4 Pose parameter curve

如图4所示,曲线表现了设定运动轨迹条件下动平台质心的大致运动规律,如式(16)所示。

$$\begin{cases} \beta = 20 \sin(\frac{\pi}{6}t - \frac{\pi}{3}) + 3 \\ \gamma = -25 \cos(\frac{\pi}{8}t) + 10 \\ x = -25 \sin(\frac{\pi}{6}t) + 175 \end{cases} \quad (16)$$

将式(16)中3个参数的运动规律代入运动学逆解式(9),通过Matlab计算得到设定轨迹下的电机转角运动曲线。3个电机转角整体呈周期性变化,如图5所示。

θ_1 表示UPU支链下的电机转动角度, θ_2 和 θ_3 是2条UU支链下的转角。由图5可以看出, θ_1 的极差比 θ_2 、 θ_3 的极差大,说明动平台在运动过程中UPU支链的加速度变化较大,而 θ_2 、 θ_3 曲线无论是在变化趋势还是在数值上都相差不大,验证了逆运动学的

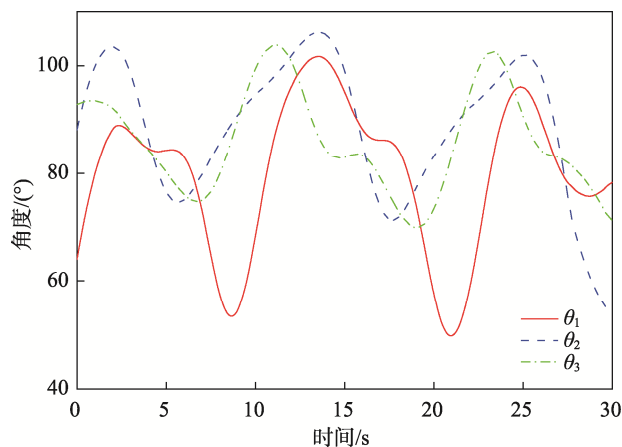


图5 电机转角曲线
Fig.5 Curves of motor angles

正确性。总体来看,3条曲线走势平滑、无明显突变,呈一定的周期性变化,从另一方面也验证了逆运动学的正确性。

5 动力学特性研究

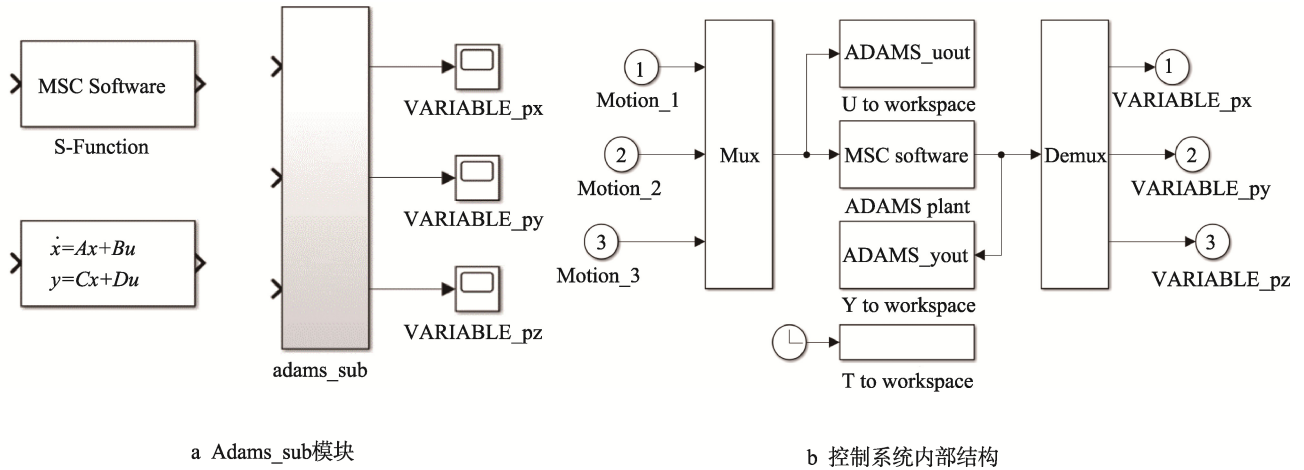
为了验证所建立的动力学模型的正确性,利用Matlab和Adams软件对其进行仿真分析。设置静平台边长为0.35 m,动平台边长为0.31 m,支链长度为0.25 m,移动副的最大移动距离为0.12 m。根据以上结构参数在SolidWorks中建立三维模型,定义材料为普通碳素钢,密度为7 800 kg/m³,保存为“.x_t”格式文件。

将SolidWorks三维模型导入Adams中,将逆运动学仿真所得的3个位姿参数作为输入,利用Adams Control插件传递到Matlab Simulink插件中,打开Matlab软件,输入Adams sys命令,调用Adams_sub模块进行动力学联合仿真。Adams_sub模块图及其控制系统内部结构如图6所示。

为了控制并联分拣机构,按照图3的轨迹运动,设计PID控制器对机构进行闭环控制。联合仿真控制系统模型如图7a所示,其中 k_p 、 k_i 、 k_d 分别表示PID控制中的比例、积分和微分环节。将Simulink的Scope窗口中得到的质心位姿参数与输入值进行对比,根据对比结果调整PID控制参数,最终得到的PID传递函数见式(17)。

$$G(s) = 21(1 + \frac{1}{3.2813s} + 0.3857s) \quad (17)$$

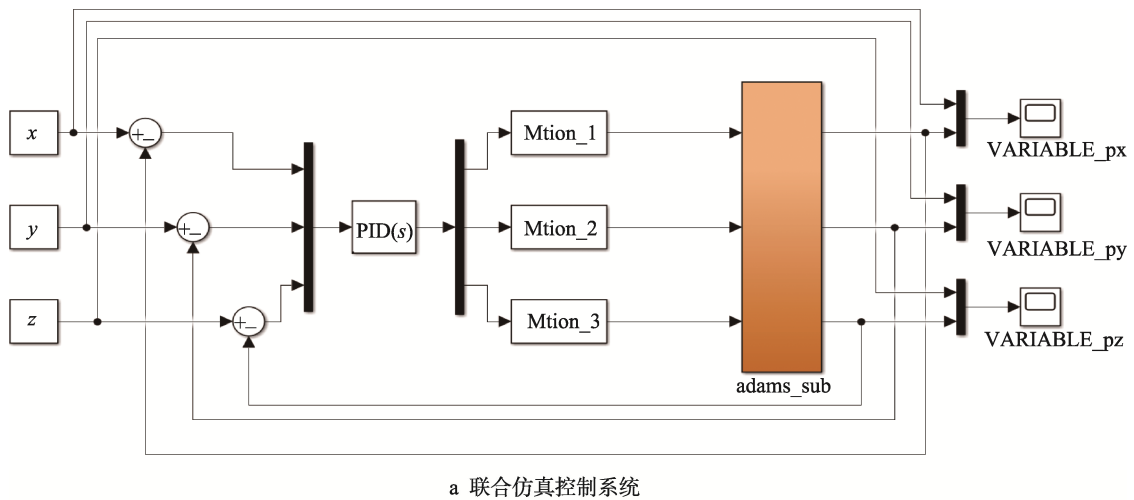
PID控制器模块如图7b所示。建立仿真模型后,在Simulink中对控制参数进行设置。其中,联合仿真的通信时间间隔为0.01 s,固定步长为0.001 s,仿真计算时间为4 s。



a Adams_sub模块

b 控制系统内部结构

图 6 Adams_sub 模块图及其控制系统内部结构
Fig.6 Adams_sub module diagram and internal structure of its control system



a 联合仿真控制系统

b PID模块

图 7 联合仿真控制系统及 PID 模块
Fig.7 Joint simulation control system and PID module diagram

通过 Adams 和 Matlab Simulink 联合仿真, 得到 3 个驱动关节相应的驱动力矩曲线, 如图 8a 所示。该曲线呈一定规律性变化, 走势平滑, 无明显突变。在 Matlab 软件中将式 (15) 的动力学模型及有关结构参数进行编程, 并计算, 得到 3 个驱动关节的驱动力矩, 如图 8b 所示。

在联合仿真下支链质心的加速度曲线如图 9 所示。曲线平滑无断点, 说明机器人运动平稳, 适用于

对货物的快速、精准分拣。

将图 8a 的仿真数据与图 8b 的理论值之差所占理论值的百分比进行误差分析, 如图 10 所示。驱动关节 1 的误差曲线变化较大, 最大误差为 0.379%, 驱动关节 2、驱动关节 3 的曲线较平滑, 最大误差分别为 0.283%、0.146%, 驱动误差均在合理范围内, 验证了动力学的正确性。

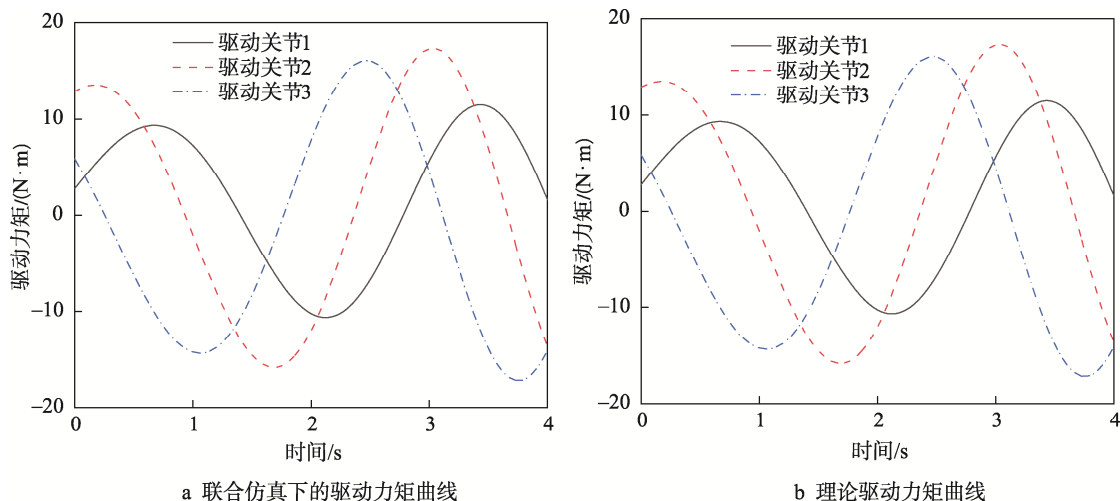


图8 驱动力矩曲线
Fig.8 Driving moment curves

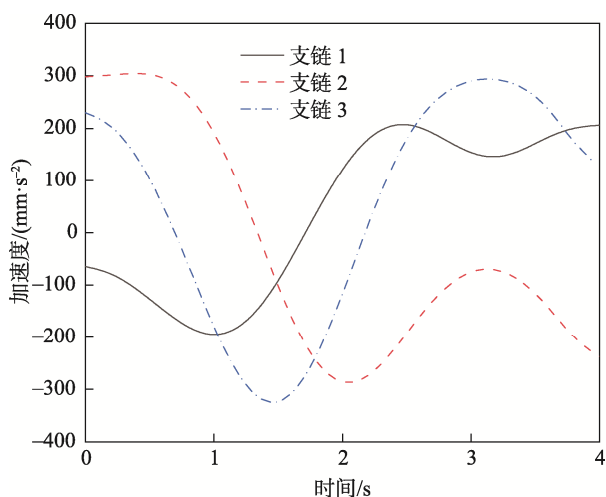


图9 联合仿真下支链质心加速度
Fig.9 Acceleration of branch chain centroid

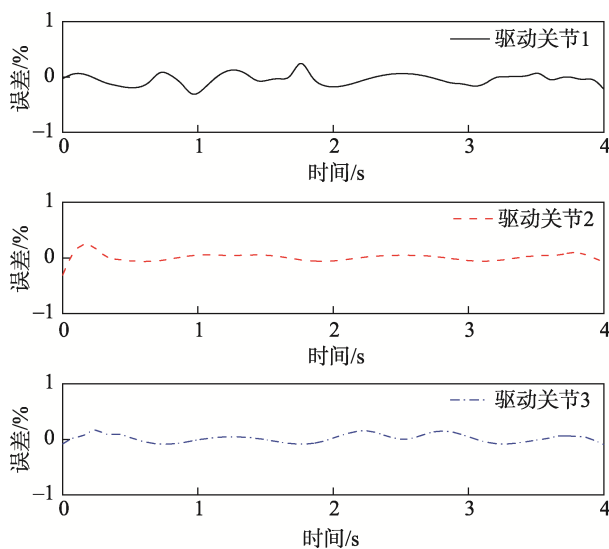


图10 驱动力矩的误差曲线
Fig.10 Error curves of driving moment

6 结语

1) 建立了 2UU-UPU 三自由度并联机器人的位姿方程, 推导了机器人位姿与变量之间的关系, 确定了机器人的自由度和各参数之间的关系函数。

2) 构建了 2UU-UPU 并联机器人的运动学模型, 求出了机器人的运动学逆解。采用拉格朗日公式求解了 2UU-UPU 并联机器人的动力学方程, 推导了系统驱动的广义力。

3) 开展了运动学仿真分析, 得到了支链的转角位移曲线和电机的转角曲线。曲线光滑、无明显突变, 说明该机构在运动过程中运行平稳, 验证了机构设计的可行性。

4) 通过动力学联合仿真, 获得了联合仿真下驱动关节的驱动力矩曲线。对驱动关节的驱动力矩进行了理论求解, 对比分析了理论与仿真值的误差, 验证了动力学理论推导的正确性, 为自动化生产线上产品的精准快速分拣包装提供了理论参考。

参考文献:

- [1] 张英坤. Delta 并联机器人的研究进展[J]. 机床与液压, 2016, 44(21): 16-20.
ZHANG Y K. Research Progress and Status of Delta Parallel Robot[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2016, 44(21): 16-20.
- [2] 李永泉, 蔡俊, 李玉昆, 等. 运动分岔并联机构运动学性能分析[J]. 农业机械学报, 2023, 54(4): 447-458.
LI Y Q, CAI J, LI Y K, et al. Kinematics Performance Analysis of Bifurcation Parallel Mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machi-

- nery, 2023, 54(4): 447-458.
- [3] 刘荣帅, 李清, 杜昱东, 等. 3-CUR 并联分拣机器人的运动学分析与仿真[J]. 包装工程, 2019, 40(21): 179-186.
- LIU R S, LI Q, DU Y D, et al. Kinematics Analysis and Simulation of 3-CUR Parallel Sorting Robot[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(21): 179-186.
- [4] 刘娟, 李瑞琴, 王远, 等. 酒包生产线 1R2T 并联机构构型综合及运动学分析[J]. 机械传动, 2023, 47(6): 42-48.
- LIU J, LI R Q, WANG Y, et al. Configuration Synthesis and Kinematics Analysis of the 1R2T Parallel Mechanism in the Chinese Baijiu Box Packaging Production Line[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2023, 47(6): 42-48.
- [5] 卜政伟, 高健. 2PRC-PCR 并联机构的运动学及工作空间分析[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2023(6): 44-47.
- BU Z W, GAO J. Kinematics and Workspace Analysis of 2PRC-PCR Parallel Mechanism[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2023(6): 44-47.
- [6] 李永泉, 郭雨, 张阳, 等. 基于牛顿欧拉法的一种空间被动过约束并联机构动力学建模方法[J]. 机械工程学报, 2020, 56(11): 48-57.
- LI Y Q, GUO Y, ZHANG Y, et al. Dynamic Modeling Method of Spatial Passive Over-Constrained Parallel Mechanism Based on Newton Euler Method[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(11): 48-57.
- [7] 胡映光. 3-RPS 并联机构正解及力学的研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2018: 47-61.
- HU Y G. Research on Positive Solution and Mechanics of 3-RPS Parallel Mechanism[D]. Shenyang: Northeastern University, 2018: 47-61.
- [8] 杨朔. 基于二并联机床的运动误差和标定系统研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2020: 42-53.
- YANG S. Research on Motion Error and Calibration System Based on 2-DOF Parallel Machine Tools[D]. Shenyang: Northeastern University, 2020: 42-53.
- [9] WU Y, YANG Z, FU Z, et al. Kinematics and Dynamics Analysis of a Novel Five-Degrees-of-Freedom Hybrid Robot[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2017, 14(3): 172988141771663.
- [10] GALLARDO-ALVARADO J, RODRÍGUEZ-CASTRO R, DELOSSANTOS-LARA P J. Kinematics and Dynamics of a 4-PRUR Schönflies Parallel Manipulator by Means of Screw Theory and the Principle of Virtual Work[J]. Mechanism and Machine Theory, 2018, 122: 347-360.
- [11] ZHANG D S, XU Y D, YAO J T, et al. Kinematics, Dynamics and Stiffness Analysis of a Novel 3-DOF Kinetically/Actuation Redundant Planar Parallel Mechanism[J]. Mechanism and Machine Theory, 2017, 116: 203-219.
- [12] CHAI X X, WANG M, XU L M, et al. Dynamic Modeling and Analysis of a 2PRU-UPR Parallel Robot Based on Screw Theory[J]. IEEE Access, 2020, 8: 78868-78878.
- [13] WANG X J, WU J, WANG Y T. Dynamics Evaluation of 2UPU/SP Parallel Mechanism for a 5-DOF Hybrid Robot Considering Gravity[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2021, 135: 103675.
- [14] 董旭, 高铁红. 三自由度并联包装机构动力学建模与分析[J]. 包装工程, 2020, 41(15): 81-87.
- DONG X, GAO T H. Dynamic Modeling and Analysis of 3-DOF Parallel Packaging Mechanism[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(15): 81-87.
- [15] 杨应洪, 尹显明. 一种 2RPS-RPU 并联机构的动力学分析[J]. 机械设计与制造, 2019(9): 58-62.
- YANG Y H, YIN X M. Dynamic Analysis of 2RPS-RPU Parallel Mechanism[J]. Machinery Design & Manufacture, 2019(9): 58-62.