

一种装箱作业并联机器人机构的运动性能

孟维健¹, 张艳伟¹, 程建豪², 崔国华¹

(1.河北工程大学, 邯郸 056038; 2.三门峡黄河明珠(集团)有限公司, 三门峡 472000)

摘要: **目的** 针对目前食品、药品等装箱作业要求, 将一种新型二自由度平面并联机器人用于装箱生产线的作业机构, 并对其运动性能进行研究, 确定其能否满足生产要求。**方法** 对并联机构进行运动学分析, 建立并联机器人的雅可比矩阵, 利用几何法求解位置正、逆解; 引入稳定性、运动分辨率和刚度性能指标, 对机构进行运动性能分析, 绘制稳定性和运动分辨率在工作空间内的性能分布图谱, 研究机构在竖直方向上的刚度性能。**结果** 该并联机构在实际装箱作业中的运动性能较为稳定, 抓取或者放置物体阶段具有较高精度, 且竖直方向的刚度较高。**结论** 该新型二自由度平面并联机器人能够满足产品的装箱作业, 在实际装箱作业中取得了广泛应用。

关键词: 并联机构; 雅可比矩阵; 稳定性; 运动分辨率; 刚度

中图分类号: TB486; TP242.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2017)05-0072-06

The Kinematic Performance of a Parallel Robot Mechanism for Packaging

MENG Wei-jian¹, ZHANG Yan-wei¹, CHENG Jian-hao², CUI Guo-hua¹

(1. Hebei University of Engineering, Handan 056038, China;

2. Sanmenxia Yellow River Pearl (Group) Co., Ltd., Sanmenxia 472000, China)

ABSTRACT: The work aims to determine whether the new parallel robot with 2-DOF (degree of freedom) plane can meet the production requirements by applying it to the packaging production line and researching its kinematic performance, with respect to the packaging requirements of current food and drug. By means of analyzing the kinetics of parallel mechanism and establishing the Jacobian matrix of parallel robot, geometric method was used to obtain the positive and inverse solutions. Meanwhile, stability, kinematic resolution and stiffness indicators were introduced to analyze the kinematic performance of the mechanism, draw the performance distribution map of stability and kinematic resolution in the working space, and study the stiffness of the mechanism in the vertical direction. The research showed that the kinematic performance of the parallel mechanism in the actual packaging was quite stable. The parallel mechanism was of high accuracy when grabbing or placing the object and the stiffness in vertical direction was quite high. This new parallel robot with 2-DOF plane can satisfy the packaging requirements of products and it has been widely used in the actual packaging.

KEY WORDS: parallel mechanism; Jacobian matrix; stability; kinematic resolution; stiffness

自动装箱生产线是以开箱装置、输送装置、装箱装置、封箱装置和码垛装置并配以控制系统为一体的自动化生产线。装箱装置作为整条生产线最核心的部分, 其运行状态直接影响装箱作业的效率。Clavel 等^[1]发明了 Delta 机器人, 瑞士 Demareux 公司在本体上进行应用与开发, 实现了食品、医药等行业的分拣、包装及

抓放作业。Nabat 等^[2]发明了一种四自由度并联机器人 Par4, 实现了产品高加速、低振动拾放作业。Delta 机器人与 Par4 四自由度并联机器人主要针对空间上产品的拾放, 对于单平面内产品的拾放来说, 使用多个电机驱动必然是一种资源的浪费。黄田等^[3]发明了二自由度高速并联机器人 Diamond, 实现了平面内产

收稿日期: 2016-06-06

基金项目: 河北省自然科学基金 (E2015402130)

作者简介: 孟维健 (1991—), 男, 河北工程大学硕士生, 主攻并联机器人。

通讯作者: 张艳伟 (1977—), 女, 硕士, 河北工程大学副教授, 主要研究方向为工程机器人机构学。

品的高精度拾放作业,弥补了国内市场包装行业的空缺,但 Diamond 机器人采用完全对称的三连杆从动臂结构,必将增加机构的质量,同时多旋转副连接方式必将带来间隙误差的增加。

针对目前的平面内产品装箱作业要求,文中选用一种单侧双平行四边形的二自由度平面并联机器人作为整条生产线的装箱装置,对其进行运动学分析,建立机构的数学模型,通过位置逆解来求解并联机构的雅可比矩阵。在雅可比矩阵和运动灵巧性的基础上,引入全域灵巧性和波动量指标,从而确定并联机构的稳定性;根据位置正解确定并联机构的末端空间位置,建立运动分辨率指标;运用 Ansys 分析确定竖直方向的变形量,从而确定机构刚度指标。

1 机构模型的描述

二自由度平面并联机器人见图 1,其主要由机架、动平台以及连接机架和动平台的 2 条支链构成。左支链由主动臂、从动臂组成,从动臂采用 2 根对称的单杆组成,增加了支链的刚度与承载能力。右支链由主动臂、主动臂连杆、铰接板、从动臂、从动臂连杆组成,主动臂与主动臂连杆、从动臂与从动臂连杆通过铰接板构成 2 个平行四边形结构^[4]。因采用 2 组平行四边形结构,不仅限制了末端转动,实现了末端位置与姿态的解耦,还提高了机器人末端在竖直方向的整体刚度^[5]。在主动臂连杆、从动臂连杆以及从动臂两端均采用较小倾角的球铰接连接,以减少因零件加工制造而产生的装配误差。整个并联机器人全部采用转动副驱动,实现了单平面内的 x, y 方向平动,大大提高了动平台的运行速度和加速度。

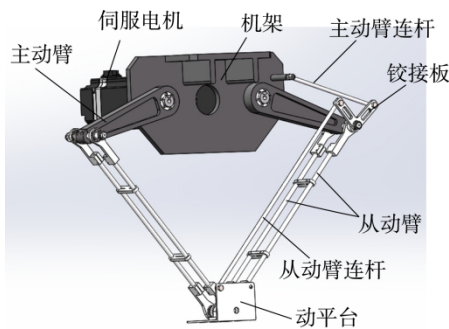


图 1 二自由度平面并联机器人

Fig.1 Planar parallel manipulator with two degree of freedom

2 机构运动学模型的建立

考虑到 2 组平行四边形是为了限制动平台旋转,以及 2 根对称的单杆只是为了增加支链的刚度与承载能力,在对并联机构进行运动学分析时,可以将机构简化成对称的五连杆铰接机构。以 2 根主动臂对称中心点为原点,建立参考坐标系 xOy , 见图 2。机架

主动臂转轴间距为 $2r$, 机器人主动臂长为 l_1 , μ_2 和 μ_1 分别为左右主动臂单位方向向量;从动臂长为 l_2 , σ_2 和 σ_1 分别为左右从动臂单位方向向量;动平台位置矢量 $\mathbf{O}'(x, y)$, 矢量 $\mathbf{S}$ 为 $\mathbf{O}'$ 相对于 $\mathbf{O}$ 的位置矢量。机器人的输入关节转角为 α_1 和 α_2 , 从动臂关节转角为 β_1 和 β_2 。

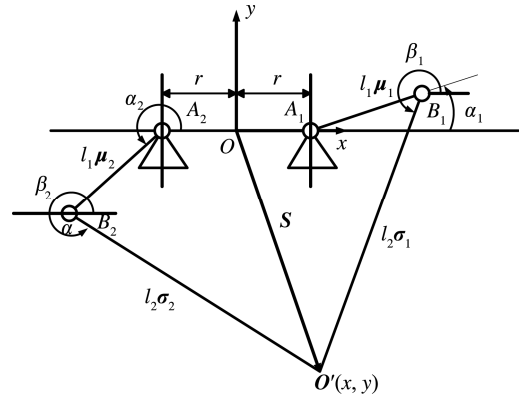


图 2 二自由度平面并联机器人结构

Fig.2 The structure diagram of planar parallel manipulator with two degree of freedom

2.1 机构位置正解求解

机构位置正解涉及已知主动臂转角 $\alpha_i (i=1, 2)$, 求解动平台的位置矢量 $\mathbf{O}'(x, y)$ 。根据机构几何关系^[6], 在参考坐标系下构造如下方程组:

$$\begin{cases} -r + l_1 \cos \alpha_2 + l_2 \cos \beta_2 - l_2 \cos \beta_1 - l_1 \cos \alpha_1 + r = 0 \\ l_1 \sin \alpha_2 + l_2 \sin \beta_2 - l_2 \sin \beta_1 + l_1 \sin \alpha_1 = 0 \end{cases} \quad (1)$$

动平台位置矢量参考点 $\mathbf{O}'(x, y)$ 可表示为:

$$\begin{cases} x = -r + l_1 \cos \alpha_2 + l_2 \cos \beta_2 \\ y = l_1 \sin \alpha_2 + l_2 \sin \beta_2 \end{cases} \quad (2)$$

或

$$\begin{cases} x = r + l_1 \cos \alpha_1 + l_2 \cos \beta_1 \\ y = l_1 \sin \alpha_1 + l_2 \sin \beta_1 \end{cases} \quad (3)$$

将式(1)消去 β_2 并整理得:

$$A + B \cos \beta_1 + C \sin \beta_1 = 0 \quad (4)$$

式中: $A = 2l_1^2 [1 - \cos(\alpha_1 + \alpha_2)]$;

$B = 2l_1 l_2 (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2)$; $C = -2l_1 l_2 (\sin \alpha_1 + \sin \alpha_2)$ 。

令 $\delta = \tan \frac{\beta_1}{2}$, 则 $\cos \beta_1 = \frac{1 - \delta^2}{1 + \delta^2}$, $\sin \beta_1 = \frac{2\delta}{1 + \delta^2}$,

将 δ 带入式(4)并整理可得:

$$(A - B)\delta^2 + 2C\delta + (A + B) = 0 \quad (5)$$

求解式(5)可得 $\delta = \frac{-C \pm \sqrt{C^2 - (A^2 - B^2)}}{A - B}$, 从而可求出 $\beta_1 = 2 \arctan \delta$, 将其带入式(3)从而确定 $\mathbf{O}'$ 坐标为:

$$\begin{cases} x = r + l_1 \cos \alpha_1 + l_2 \cos \beta_1 \\ y = l_1 \sin \alpha_1 + l_2 \sin \beta_1 \\ \beta_1 = 2 \arctan \delta \end{cases} \quad (6)$$

2.2 机构位置逆解求解

机构位置逆解涉及已知动平台的位置矢量 $O'(x, y)$, 求解主动臂转角 $\alpha_i (i=1, 2)$ 。对式(3)消去 β_1 并整理得:

$$D \cos \alpha_1 + E \sin \alpha_1 + F = 0 \quad (7)$$

式中: $D = -2l_1(x-r)$; $E = -2l_1y$; $F = (x-r)^2 + l_1^2 - l_2^2 + y^2$ 。

令 $\xi = \tan \frac{\alpha_1}{2}$, 同理可得 $\xi = \frac{-E \pm \sqrt{E^2 + D^2 - F^2}}{F - D}$, 则:

$$\alpha_1 = 2 \arctan \xi \quad (8)$$

对式(2)消去 β_2 并整理得:

$$G \cos \alpha_2 + H \sin \alpha_2 + I = 0 \quad (9)$$

式中: $G = -2l_1(x+r)$; $H = -2l_1y$; $I = (x+r)^2 + l_1^2 - l_2^2 + y^2$ 。

令 $\kappa = \tan \frac{\alpha_2}{2}$, 同理可得 $\kappa = \frac{-H \pm \sqrt{H^2 - I^2 + G^2}}{I - G}$,

则:

$$\alpha_2 = 2 \arctan \kappa \quad (10)$$

由式(8)和(10)可确定主动臂转角 α_1, α_2 。

2.3 机构速度雅可比矩阵

对式(1)关于时间求导, 得:

$$\begin{cases} -l_1 \sin(\alpha_2) \cdot \dot{\alpha}_2 - l_2 \sin(\beta_2) \cdot \dot{\beta}_2 + l_2 \sin(\beta_1) \cdot \dot{\beta}_1 + \\ l_1 \sin(\alpha_1) \cdot \dot{\alpha}_1 = 0 \\ l_1 \cos(\alpha_2) \cdot \dot{\alpha}_2 + l_2 \cos(\beta_2) \cdot \dot{\beta}_2 - l_2 \cos(\beta_1) \cdot \dot{\beta}_1 + \\ l_1 \cos(\alpha_1) \cdot \dot{\alpha}_1 = 0 \end{cases} \quad (11)$$

将式(11)做变换得:

$$\begin{bmatrix} \dot{\beta}_1 \\ \dot{\beta}_2 \end{bmatrix} = \mathbf{K} \begin{bmatrix} \dot{\alpha}_1 \\ \dot{\alpha}_2 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\text{式中: } \mathbf{K} = \begin{bmatrix} \frac{l_1 \sin(\alpha_1 + \beta_2)}{l_2 \sin(\beta_1 - \beta_2)} & -\frac{l_1 \sin(\alpha_2 - \beta_2)}{l_2 \sin(\beta_1 - \beta_2)} \\ \frac{l_1 \sin(\alpha_1 + \beta_1)}{l_2 \sin(\beta_1 - \beta_2)} & -\frac{l_1 \sin(\alpha_2 - \beta_1)}{l_2 \sin(\beta_1 - \beta_2)} \end{bmatrix}。$$

对式(3)求得:

$$\begin{cases} \dot{x} = -l_1 \sin(\alpha_1) \cdot \dot{\alpha}_1 - l_2 \sin(\beta_1) \cdot \dot{\beta}_1 \\ \dot{y} = l_1 \cos(\alpha_1) \cdot \dot{\alpha}_1 + l_2 \cos(\beta_1) \cdot \dot{\beta}_1 \end{cases} \quad (13)$$

则动平台中心点速度与主动臂转角速度的映射关系为:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -l_1 \sin \alpha_1 & 0 \\ l_1 \cos \alpha_1 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -l_2 \sin \beta_1 & 0 \\ l_2 \cos \beta_1 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{K} = \mathbf{J} \begin{bmatrix} \dot{\alpha}_1 \\ \dot{\alpha}_2 \end{bmatrix} \quad (14)$$

式中:

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \frac{-l_1 \sin \alpha_1 (\sin(\alpha_1 + \beta_2) + \sin(\beta_1 - \beta_2))}{\sin(\beta_1 - \beta_2)} & \frac{l_1 \sin \alpha_1 \sin(\alpha_2 - \beta_2)}{\sin(\beta_1 - \beta_2)} \\ \frac{l_1 \sin(\alpha_1 + \beta_2) \cos \beta_2}{\sin(\beta_1 - \beta_2)} & \frac{l_1 \sin(\alpha_2 - \beta_2) \cos \beta_1}{\sin(\beta_1 - \beta_2)} \end{bmatrix},$$

映射系数 $\mathbf{J}$ 为机构的速度雅可比矩阵。

3 并联机构性能指标的建立

根据装箱机构的功能要求与特点, 选择稳定性、运动分辨率和刚度性能作为运动性能评价指标^[7]。

3.1 稳定性指标

选用雅可比矩阵的条件数的倒数作为机构局部灵巧性(L_{CI})的评价指标^[8]。

$$L_{CI} = 1 / \kappa(\mathbf{J}) = \frac{1}{\|\mathbf{J}\| \|\mathbf{J}^{-1}\|} \quad (15)$$

式中: $\kappa(\mathbf{J})$ 为雅可比矩阵的条件数; $\|\cdot\|$ 为矩阵的谱范数。

通常 $0 \leq L_{CI} \leq 1$, 若 $L_{CI}=1$, 表明机构在此位形下处于各向同性, 机构运动传递性能最佳; 若 $L_{CI}=0$, 表明机构处于奇异位形, 机构的雅可比矩阵为病态矩阵, 机构输入与输出之间的传递将会出现失真现象, 机构精度严重恶化^[9]。为对机构在整个工作空间内的整体性能的评估, 采用 Gosselin 提出的全域灵巧性指标(G_{CI})^[10]:

$$G_{CI} = \frac{\int_W L_{CI} dW}{dW} \quad (16)$$

式中: W 为作业空间。

G_{CI} 的大小反映了机构在作业空间内运动性能的均值。为了提高机构性能评价标准, 根据均方差理论提出波动评价指标 F_{CI} ^[11-14]:

$$F_{CI} = \sqrt{\frac{\int_W (L_{CI} - G_{CI})^2 dW}{\int_W dW}} \quad (17)$$

F_{CI} 反映了灵巧性的全域波动量。 F_{CI} 越大则表明机构在作业空间内的波动越大, 运动性能变动幅度越大; F_{CI} 越小则表明机构在作业空间内的波动越小, 运动性能越稳定。

3.2 运动分辨率指标

通常采用动平台末端点 O' 在位置 $(x, y)^T$ 下对驱动关节转角的运动分辨率来衡量机构运动精度^[15]。动平台末端点 O' 相对于驱动关节转角的映射关系可以表示为:

$$R_\alpha = \sqrt{(dx)^2 + (dy)^2} = \sqrt{\left(\frac{\partial x}{\partial \alpha_1} d\alpha_1 + \frac{\partial x}{\partial \alpha_2} d\alpha_2\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial \alpha_1} d\alpha_1 + \frac{\partial y}{\partial \alpha_2} d\alpha_2\right)^2} \quad (18)$$

由式(7)和式(9)可得:

$$-2l_1(x-r) \cos \alpha_1 - 2l_1 y \sin \alpha_1 + (x-r)^2 + l_1^2 - l_2^2 + y^2 = 0 \quad (19)$$

$$-2l_1(x+r) \cos \alpha_2 - 2l_1 y \sin \alpha_2 + (x+r)^2 + l_1^2 - l_2^2 + y^2 = 0 \quad (20)$$

分别将式(19)—(20)对 α_1 求偏导数, 可得:

$$(x-r-l_1 \cos \alpha_1) \frac{\partial x}{\partial \alpha_1} + (y-l_1 \sin \alpha_1) \frac{\partial y}{\partial \alpha_1} + l_1[(x-r) \cdot \sin \alpha_1 - y \cos \alpha_1] = 0 \quad (21)$$

由式(21)—(22)解得:

$$\frac{\partial x}{\partial \alpha_1} = \frac{l_1[(r-x) \sin \alpha_1 + y \cos \alpha_1](y-l_1 \sin \alpha_2)}{l_1(\sin \alpha_1 - \sin \alpha_2)x + (l_1 \cos \alpha_2 - l_1 \cos \alpha_1 - 2r)y + l_1^2 \sin(\alpha_2 - \alpha_1) - l_1 r(\sin \alpha_1 - \sin \alpha_2)} \quad (23)$$

$$\frac{\partial y}{\partial \alpha_1} = \frac{(x+r-l_1 \cos \alpha_2)}{y-l_1 \sin \alpha_2} \cdot \frac{\partial x}{\partial \alpha_1} \quad (24)$$

同理, 可解出 $\frac{\partial x}{\partial \alpha_2}$ 和 $\frac{\partial y}{\partial \alpha_2}$ 为:

$$\frac{\partial x}{\partial \alpha_2} = \frac{l_1[(r-x) \sin \alpha_2 + y \cos \alpha_2](y-l_1 \sin \alpha_1)}{l_1(\sin \alpha_2 - \sin \alpha_1)x + (l_1 \cos \alpha_1 - l_1 \cos \alpha_2 - 2r)y + l_1^2 \sin(\alpha_1 - \alpha_2) - l_1 r(\sin \alpha_2 - \sin \alpha_1)} \quad (25)$$

$$\frac{\partial y}{\partial \alpha_2} = \frac{(x+r-l_1 \cos \alpha_1)}{y-l_1 \sin \alpha_1} \cdot \frac{\partial x}{\partial \alpha_2} \quad (26)$$

将式(23)—(26)代入式(18)可得出动平台末端点 O' 相对于驱动关节转角 α_1, α_2 的映射关系。

考虑到 R_a 只是代表动平台末端点相对于驱动关节转角的一种映射关系, 为了表征机构在各个位姿下的运动性能, 引入局部运动分辨率评价指标:

$$\chi = \kappa(J)R_a \quad (27)$$

式中: $\kappa(J)$ 为雅可比矩阵条件数。

参照全域运动灵巧性指标, 同时引入全域运动分辨率^[16]指标 $\bar{\chi}$, 可得:

$$\bar{\chi} = \frac{\int_W \chi dW}{dW} \quad (28)$$

由式(28)可知, $\bar{\chi}$ 越大代表机构在整个作业空间内精度越高, 反之精度越低。

3.3 机构刚度指标

利用有限元分析方式对机构进行刚度分析, 在不影响分析结果准确性的情况下, 对机构进行简化。通过网格划分、定义材料属性、装配约束以及施加载荷等前期处理工作, 经 Ansys 分析后由 Hyperview 确定 y 方向上的最大变形量作为衡量机构刚度的标准^[17]。含有平行四边形机构的有限元模型见图 3。

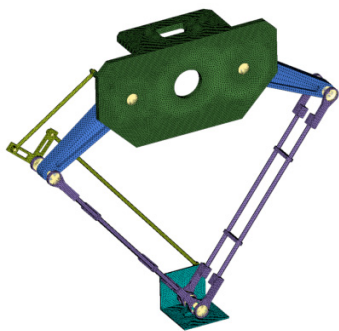


图3 二自由度平面并联机器人有限元模型

Fig.3 The finite element model of planar parallel manipulator with two degree of freedom

4 应用算例与机构性能分析

该二自由度平面并联机器人已成功应用于某公司的药盒装箱生产线, 并联机器人运行速度达 6 m/s, 最大加速度为 40 m/s², 重复定位精度为 0.5 mm, 药盒装箱速度达到每分钟 10 箱。实践证明, 该二自由度平面并联机器人具有较高的可行性和应用价值。根据药盒实际装箱作业要求, 设定该平面并联机器人的作业空间为 $-500 \text{ mm} \leq x \leq 500 \text{ mm}$, $-850 \text{ mm} \leq y \leq -600 \text{ mm}$, 见图 4, 动平台的运行轨迹为 $b-a-b-c-d-c-b$, 其中 a, d 2 点分别为药盒抓取点和放置点, a, b, c, d 点的坐标分别为 $(500, -850), (500, -600), (-500, -600), (-500, -850)$ 。设定两主动臂转角范围分别为 $-4\pi/9 \leq \alpha_1 \leq 7\pi/9$, $29\pi/36 \leq \alpha_2 \leq 13\pi/9$ 。同时选择动平台施加载荷 150 N。将上述参数值分别带入各项指标的求解公式中, 并运用 Matlab 求解得出各项性能图谱, 并对图谱进行分析。

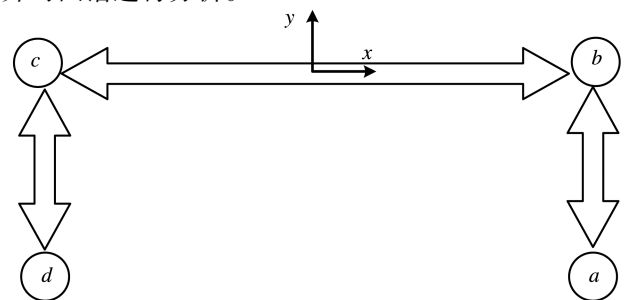


图4 动平台运动轨迹

Fig.4 The moving platform trajectory

4.1 稳定性分析

根据并联机器人的作业空间范围, 求解其局部灵巧性以及灵巧性的全域波动量指标, 从而判断机构的稳定性。并联机构灵巧性的全域波动量分布见图 5, 可以看出, 并联机构在作业空间内的整体波动量较

小,其最大波动量 $F_{C\max}=0.3394$ 主要出现在动平台吸取和放置阶段,并联机构在作业空间内的运动稳定性较好。

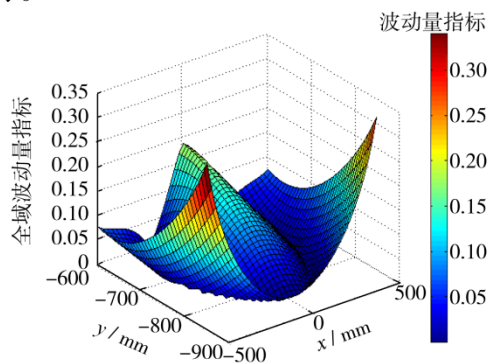


图5 作业空间的波动量分布

Fig.5 Distribution of the fluctuations in the workspace

4.2 运动分辨率分析

根据并联机器人的两主动臂转角范围,求解其局部分辨率和全域分辨率指标,从而确定机构的精度变化。并联机构在作业空间内的局部分辨率和全域分辨率情况见图6。由图6a可知,随着右转动臂转角的变大或左主动臂转角的变小,并联机构的局部分辨率增大,说明并联机构在两侧抓取和放置过程中运动精度较高,其变化范围为(10.9367, 574.7637)。由图6b可以看出,并联机构在作业空间内的全域运动分辨率随着左主动臂转角的变化产生的变化幅度较小,当达到一

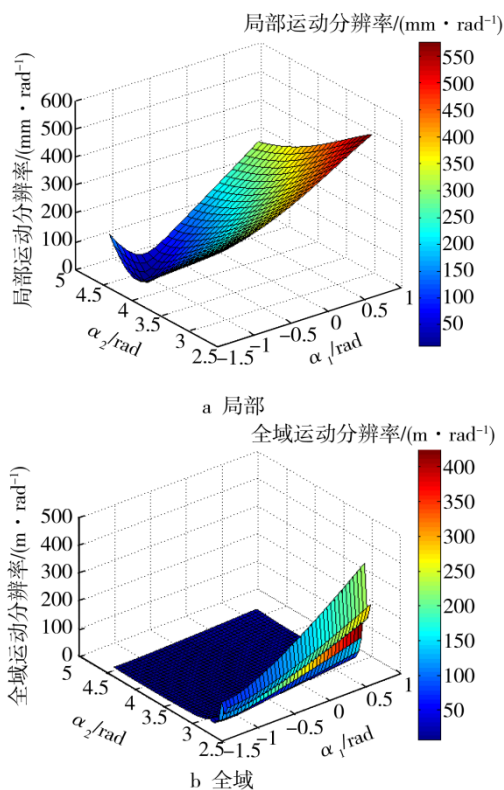


图6 作业空间的运动分辨率分布

Fig.6 Distribution of the kinematic resolution in the workspace

定值时会突然增大,随着右主动臂转角改变产生的变化稳定增长。其变化范围(7421.0758, 422 793.1327),但是当并联机构处于抓取或者放置物体阶段具有较高精度。

4.3 刚度分析

在Hyperview中,分别对去除平行四边形和含有平行四边形2种结构的动平台施加150 N的力,分析2种情况下的变形量。图7a为机构去除平行四边形结构,其沿y向最大变形量为0.1394 mm,变形量关于y轴成对称状,并未出现突变状况。图7b为机构含有平行四边形结构,其沿y向最大变形量为0.0638 mm,由于并联机构在竖直方向的变形量小于实际装箱作业预留缝隙0.1 mm,满足机构刚度要求。且具有平行四边形结构一侧的变形量明显小于另一侧,从而验证了平行四边形结构能提高动平台在竖直方向的整体刚度。

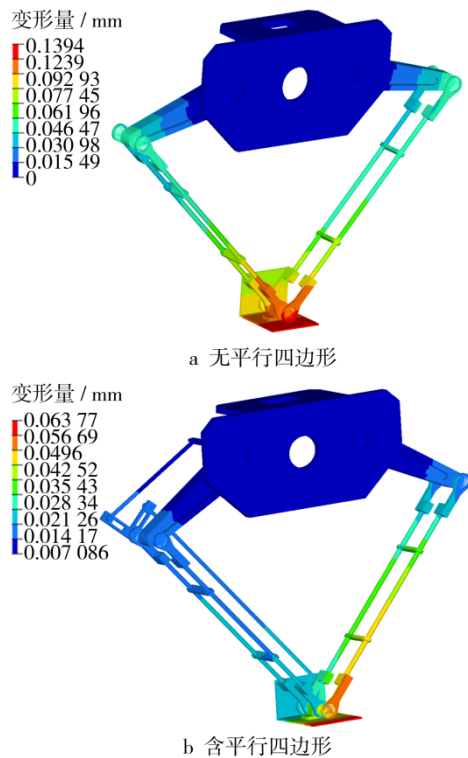


图7 机构沿y向的变形量

Fig.7 Quadrilateral along the y direction

5 结语

根据目前电子、食品、医药等行业的高速抓取、搬运和放置等操作要求,采用2组平行四边形结构,提出了一种二自由度平面并联机器人;建立该并联机器人模型、运动学模型,并对其进行作业空间内稳定性、运动分辨率以及刚度分析。分析并联机构全域运动灵巧性波动量,结果表明,并联机构的运动性能在工作空间内能够一直稳定在较高水平;通过对机构运

动分辨率的分析,确定机构在抓取和放置物体阶段具有较高的精度,可满足产品的生产要求;分析了机构在动平台施加一定载荷后竖直方向的变形情况,通过对有无平行四边形结构的对比,表明具有平行四边形结构能够明显增加竖直方向的刚度,满足装箱作业刚度要求。

参考文献:

- [1] CLAVEL R D. A Fast Robot with Parallel Geometry [C]// Proceedings of the 18th International Symposium on Industrial Robots, 1988.
- [2] NABAT V, RODRIGUEZ M, KRUT S, et al. Par4: Very High Speed Parallel Robot for Pick-and-place[C]// 2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2005: 553—558.
- [3] 黄田,李滕,李占贤. 仅含转动副的二自由度平动并联机器人机构: 中国, 01145160.2[P]. 2002-06-30.
HUANG Tian, LI Meng, LI Zhan-xian. Two DOF Parallel Robot Mechanism with Only Revolute: China, 01145160.2[P]. 2002-06-30.
- [4] 杜宏图. 二自由度平面并联机器人机构: 中国, 200820106420.8[P]. 2009-07-11.
DU Hong-tu. Two DOF Planar Parallel Robot Mechanism: China, 200820106420.8[P]. 2009-07-11.
- [5] 晏祖根,王立权,孙智慧,等. 面向食品生产的高速自动分拣系统的研究[J]. 包装工程, 2009, 30(7): 16—18.
YAN Zu-gen, WANG Li-quan, SUN Zhi-hui, et al. Study of High-speed Auto-sorting System for Food Production[J]. Packaging Engineering, 2009, 30(7): 16—18.
- [6] 王琼琦,陈安军. 高速制袋机关键机构运动学分析[J]. 包装工程, 2013, 34(15): 82—86.
WANG Qiong-qi, CHEN An-jun. Kinematic Analysis of Critical Mechanism of High Speed Bag Machine[J]. Package Engineering, 2013, 34(15): 82—86.
- [7] 王耀庭,马雪梅,陈安军. 3-PPRR 平移分拣并联机器人的运动学分析[J]. 包装工程, 2010, 31(19): 55—59.
WANG Yao-ting, MA Xue-mei, CHEN An-jun. Kinematic Analysis of 3-PPRR Translational Sorting Parallel Robot[J]. Packaging Engineering, 2010, 31(19): 55—59.
- [8] 刘宁宁,李开明. 3-(2SPS)并联机构灵巧性分析[J]. 机械制造, 2014, 43(6): 39—42.
LIU Ning-ning, LI Kai-ming. Dexterity Analysis of 3-(2SPS) Parallel Manipulator[J]. Machinery Manufacturing, 2014, 43(6): 39—42.
- [9] 王冰,聂旭萌,韩书葵. 一种平面二自由度并联机器人的设计空间及其灵巧性分析[J]. 机械传动, 2015, 39(4): 37—40.
WANG Bing, NIE Xu-meng, HAN Shu-kui. Analysis of the Design Space and Dexterity of a Planar Two Degree of Freedom Parallel Manipulator[J]. Mechanical Drive, 2015, 39(4): 37—40.
- [10] GOSSELIN C M, ANGELES J. A Globe Performance Index for the Kinematic Optimization of robotic Manipulators[J]. ASME Journal of Mechanical Design, 1991, 113(3): 220—226.
- [11] 石志新,罗玉峰,陈红亮. 机器人机构的全域性能指标研究[J]. 机器人, 2005, 27(5): 420—422.
SHI Zhi-xin, LUO Yu-feng, CHENG Hong-liang. On Global Performance Indices of Robotic Mechanisms[J]. Robot, 2005, 27(5): 420—422.
- [12] 秦志刚. 3-PPTRR 精密并联机器人的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
QIN Zhi-gang. Research on 3-PPTRR Precision Parallel Robot[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008.
- [13] 李剑秀. 机器人球面驱动关节模块分析与设计[D]. 南昌: 南昌大学, 2008.
LI Jian-xiu. Analysis and Design of Robot Spherical Joint Module with Driving[D]. Nanchang: Nanchang University, 2008.
- [14] 郭希娟,彭艳敏,耿清甲. L-Mate 机器人动力学性能分析[J]. 机械工程学报, 2008, 44(10): 123—128.
GUO Xi-juan, PENG Yan-min, GENG Qing-jia. Dynamics Performance Analysis for L-Mate Robot[J]. Mechanical Engineering, 2008, 44(10): 123—128.
- [15] 孙立宁,丁庆勇,刘新宇. 2 自由度高速高精度并联机器人的运动学优化设计[J]. 机械工程学报, 2005, 41(7): 94—98.
SUN Li-ning, DING Qing-yong, LIU Xin-yu. Optimal Kinematic Design of 2-DOF Planar Parallel Robot with High Speed and High Precision[J]. Mechanical Engineering, 2005, 41(7): 94—98.
- [16] 罗发扬. IC 制造装备中专用机器人运动学分析与设计[D]. 天津: 天津大学, 2009.
LUO Fa-yang. Kinematic Analysis and Design of a Parallel Robot for Wafer Transfer[D]. Tianjin: Tianjin University, 2009.
- [17] 崔国华,周海栋,王楠. 基于 Isight 的 3-UPS-S 并联机器人机构多目标优化[J]. 农业机械学报, 2013, 44(9): 261—266.
CUI Guo-hua, ZHOU Hai-dong, WANG Nan. Multi-objective Optimization of 3-UPS-S Parallel Mechanism Based on Isight[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(9): 261—266.