

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.03.049

一类6自由度Delta型机器人运动学分析

张俊¹ 许涛¹ 方汉良¹ 张良安²

(1. 福州大学机械工程及自动化学院, 福州 350116; 2. 安徽工业大学机械工程学院, 马鞍山 243032)

摘要: 为满足工业机器人多角度操作需求,提出了一类具有3组耦合分支,且对称分布的6自由度Delta型机器人。首先,将每组耦合分支拆分为独立运动单元,并等效为串联运动链,基于旋量理论求出等效后的运动自由度;其次,利用闭环矢量回路法分别计算耦合分支中每条主动链的位置逆解,建立机器人的逆运动学模型;在此基础上,提出一种搜索算法,用于描绘满足边界条件的机器人运动空间,并与相同尺度参数的3自由度Delta机器人进行对比。结果表明,3自由度Delta机器人的运动空间是所提机器人工作空间的子集。最后,根据理论分析,完成了工程样机的搭建与运动实验,实验结果表明,该Delta型机器人具有6个自由度运动能力,且所提运动空间搜索算法具有较高的计算精度。

关键词: Delta机器人; 自由度; 运动学; 运动空间

中图分类号: TP242 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2020)03-0419-08

OSID:



Kinematic Analysis of Novel 6-DOF Delta Robot

ZHANG Jun¹ XU Tao¹ FANG Hanliang¹ ZHANG Liang'an²

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China

2. School of Mechanical Engineering, Anhui University of Technology, Maanshan 243032, China)

Abstract: In order to meet the requirement of multi-angle operation in industrial pick-and-place applications, a novel six degree-of-freedom (DOF) Delta robot with three sets of symmetrically distributed coupled branches was proposed. Firstly, the 6-DOF Delta robot was decomposed into three sets of coupled branches, which can be regarded as independent motion units and can be further treated as equivalent serial chains. The mobility of the overall parallel mechanism was analyzed based on the screw theory to demonstrate that it had three rotational and three translational motion capabilities. Secondly, since each set of coupled branches contained two kinematic chain, the closed-loop vector method was used to calculate the inverse position solution of two chain in the coupled branch, based on which an inverse kinematic model of the proposed robot was established. Furthermore, a search algorithm was proposed to describe the robot's workspace under the boundary condition which was compared with that of a traditional 3-DOF Delta robot at the same parameter level. Simulation results showed that the workspace of a traditional 3-DOF Delta robot was a subset of that of the proposed 6-DOF Delta robot. Finally, the kinematic experiments were carried out on the engineering prototype, the results showed that the proposed robot had three degree-of-freedom of rotation and three degree-of-freedom translational motion, and can achieve multi-angle grabbing operation. In the robot workspace, the limit position of the typical motion plane was consistent with the simulation analysis results.

Key words: Delta robot; mobility; kinematics; workspace

0 引言

Delta机器人因具有响应速度快、整体质量轻等优点^[1-4],被广泛应用于高速生产线上物料的分拣、

搬运和包装等操作^[5-6]。

为拓宽Delta机器人的工业应用范围和运动性能,可以从以下两个方面入手:一方面,提高机器人末端执行器的运动自由度,使其不仅能满足相对静

收稿日期:2019-07-19 修回日期:2019-10-18

基金项目:福建省高校产学研合作项目(2019H6006)

作者简介:张俊(1981—),男,教授,博士生导师,主要从事机械动力学、机械传动与机器人机构学研究,E-mail: zhang_jun@fzu.edu.cn

平台水平方向的移动,还能实现角度的操作。CLAVEL^[7]通过在机器人的动、静平台中心处加装 RUPU 运动支链,使 3 自由度移动 Delta 机器人增加了 z 轴方向的转动(即 SCARA 运动)。但 RUPU 支链的传动精度较低,且易产生磨损^[8]。PIERROT 等^[9]相继发明了具有 SCARA 运动的 H4、I4、Heli4 以及 Par4 等 4 支链并联机器人。这 4 类机器人都在从动杆末端连接不同模块的运动换向机构,再将运动换向机构中子平台的相对平动转换为末端执行器绕 z 轴的转动。基于这一原理,LIU 等^[10]提出了 3 种具有 SCARA 运动的 Delta 型机器人,分别为 CrossIV-1、CrossIV-2 和 CossIV-3。WU 等^[11]在 3 自由度 Delta 机器人的运动平台上安装 2 自由度转头,构造了一种 5 自由度混联机器人,以提高 Delta 机器人的运动自由度。由于串接 2 自由度转头增加了动平台的负载,因此易对系统动态特性产生不利影响。另一方面,通过改变静平台的安装方法、位置和末端执行器的种类来适应和满足实际操作需求。文献[12-14]将 Delta 机器人主动臂旋转驱动方式改变为直线驱动形式。研究发现,直线型 Delta 机器人可以实现更大的工作空间,适合于 3D 打印和切削加工等应用场合^[15]。PATEL 等^[16]针对传统 Delta 型机器人应用范围的局限性,提出了一种多用途 Delta 型机器人的设计方案。该方案通过在静平台上加装导轨以提高机器人整机的运动范围,同时,将末端执行器改装成工具架,并将不同工具安装在末端执行器工作空间的边缘,以便实现操作工具的快速更换。BALMACEDA-SANTAMARIA 等^[17]提出了一种可重构 Delta 型机器人,通过在可重构的静平台上增加移动副来调整主动臂相对静平台的安装位置,可有效增加机构的工作空间,并避免奇异。

基于上述两种思路开发的各类 Delta 型机器人,虽然在工作空间和应用范围上较传统的 3 自由度移动机器人有了较大提升,但尚未有效解决末端执行器多角度操作的问题。为满足具有复杂运动的工业操作需求,本文提出一类 6 自由度 Delta 型机器人,并开展其运动学分析,计算机器人的自由度、位置逆解与工作空间。在此基础上,开展 6 自由度 Delta 型机器人的样机搭建及运动实验,以验证结构设计理论与理论分析的正确性。

1 概念设计

3 自由度 Delta 机器人拓扑构型为 $3R-(SS)^2$, 每条支链中含有一个 4S 闭环子链,如图 1 所示。

根据已有文献得知,若使并联机构具有 6 个自由度,则每条分支应为无约束支链。而基于旋量理

论,4S 闭环子链会产生沿杆 1-2 方向和 3-4 方向的约束力,所以将 4S 闭环子链拆开后得到 2 条 S-S 无约束支链,如图 2 所示。

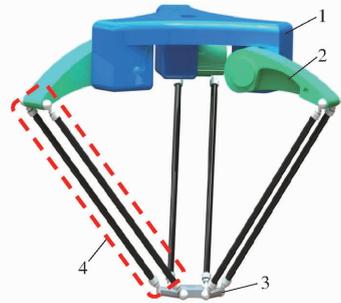


图 1 3 自由度 Delta 机器人 CAD 模型

Fig. 1 CAD model of 3-DOF Delta robot

1. 静平台 2. 主动臂 3. 动平台 4. 4S 闭环子链

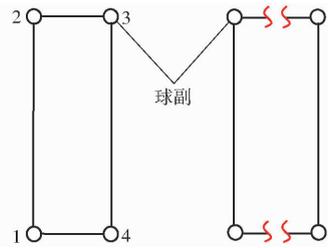


图 2 4S 闭环子链

Fig. 2 4S closed loop chain

将拆分得到的 2 条 S-S 运动链分别与主动臂串联后形成 2 条 RSS 型运动链。为不改变 Delta 型支链的结构分布,采用图 3 所示的复合式主动臂设计,即将小主动臂转动副安装在大主动臂上,得到一类具有 3 组耦合运动分支的 6 自由度 Delta 型机器人。

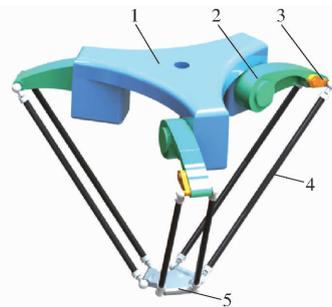


图 3 6 自由度 Delta 型机器人概念设计

Fig. 3 Conceptual design of 6-DOF Delta robot

1. 静平台 2. 大主动臂 3. 小主动臂 4. 从动杆 5. 动平台

因主动臂的复合安装形式会增加大主动臂的运动惯量,进而对机构动态性能产生不利影响。故可将小主动臂所在支链的驱动装置安装到静平台上,并不改变机构的运动性质。采用图 4 所示的平行四边形机构来等效上述耦合运动分支^[18]。其中,构件 1、4 为安装在静平台上的小主动臂和大主动臂,运动输出件 3 与构件 1 具有相同的转动方向。

上述平行四边形机构可拆分为 2 个运动分支,1-F-2-E-3 为第 1 分支,4-D 为第 2 分支。在 C 点建立局部坐标系 $CU_1V_1W_1$, V_1 轴垂直于平行四

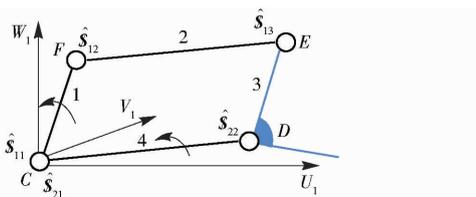


图4 平行四边形机构简图

Fig.4 Diagram of parallelogram mechanism

边形 $CDEF$ 平面, W_1 轴竖直向上。设 F 点坐标为 $(X_1, 0, Z_1)$, E 点坐标为 $(X_2, 0, Z_2)$, D 点坐标为 $(X_3, 0, Z_3)$ 。 $\hat{\mathcal{S}}_{11}$ 、 $\hat{\mathcal{S}}_{21}$ 为主动臂 1、4 相对于静平台的转动副螺旋, $\hat{\mathcal{S}}_{12}$ 、 $\hat{\mathcal{S}}_{13}$ 、 $\hat{\mathcal{S}}_{22}$ 分别为 F 、 E 、 D 点处的转动副螺旋。

第 1 分支的运动螺旋系可表示为

$$\begin{cases} \hat{\mathcal{S}}_{11} = [0 \ 1 \ 0; 0 \ 0 \ 0] \\ \hat{\mathcal{S}}_{12} = [0 \ 1 \ 0; -Z_1 \ 0 \ X_1] \\ \hat{\mathcal{S}}_{13} = [0 \ 1 \ 0; -Z_2 \ 0 \ X_2] \end{cases} \quad (1)$$

则第 1 分支的约束螺旋系为

$$\begin{cases} \hat{\mathcal{S}}_{11}^r = [0 \ 1 \ 0; 0 \ 0 \ 0] \\ \hat{\mathcal{S}}_{12}^r = [0 \ 0 \ 0; 1 \ 0 \ 0] \\ \hat{\mathcal{S}}_{13}^r = [0 \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 1] \end{cases} \quad (2)$$

第 2 分支的运动螺旋系为

$$\begin{cases} \hat{\mathcal{S}}_{21} = [0 \ 1 \ 0; 0 \ 0 \ 0] \\ \hat{\mathcal{S}}_{22} = [0 \ 1 \ 0; -Z_3 \ 0 \ X_3] \end{cases} \quad (3)$$

则第 2 分支的约束螺旋系为

$$\begin{cases} \hat{\mathcal{S}}_{21}^r = [0 \ 1 \ 0; 0 \ 0 \ 0] \\ \hat{\mathcal{S}}_{22}^r = [X_3 \ 0 \ Z_3; 0 \ 0 \ 0] \\ \hat{\mathcal{S}}_{23}^r = [0 \ 0 \ 0; 1 \ 0 \ 0] \\ \hat{\mathcal{S}}_{24}^r = [0 \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 1] \end{cases} \quad (4)$$

根据螺旋理论, 平行四边形机构的二次反螺旋为

$$\begin{cases} \hat{\mathcal{S}}_1^m = [0 \ 0 \ 0; -Z_3 \ 0 \ X_3] \\ \hat{\mathcal{S}}_2^m = [0 \ 1 \ 0; 0 \ 0 \ 0] \end{cases} \quad (5)$$

式中 $\hat{\mathcal{S}}_1^m$ —— 在 CU_1W_1 平面内的移动螺旋

$\hat{\mathcal{S}}_2^m$ —— 绕 V_1 轴线的转动螺旋

因此上述平行四边形机构相对于静平台可以等效为 2 自由度的广义副, 这个广义副由一个 P(移动) 副和一个 R(转动) 副串联组成。利用平行四边形机构等效主动臂复合安装形式, 可得图 5 所示的 6 自由度 Delta 型机器人。

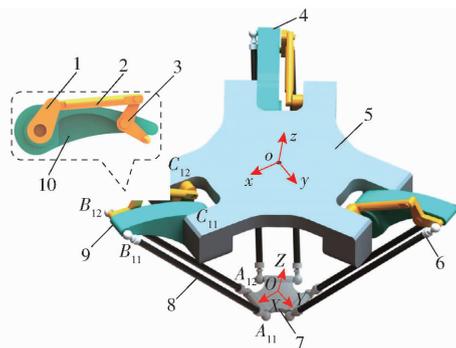


图5 6自由度Delta型机器人样机设计

Fig.5 Prototype design of 6-DOF Delta robot

- 1. 小主动臂 2. 连杆 3. 三角架 4. 分支3 5. 静平台 6. 分支2
- 7. 动平台 8. 从动杆 9. 分支1 10. 大主动臂

由图 5 可知, 该 6 自由度 Delta 型机器人由静平台、动平台和 3 组对称分布的耦合分支组成。每组耦合分支包括大主动臂、小主动臂、连杆、三角架及 2 条从动杆。其中, 大主动臂和小主动臂同轴心, 且以转动副的形式连接在静平台上。小主动臂、连杆和三角架以转动副连接并与大主动臂构成平行四边形机构。静平台与大主动臂连接处记为 C_{i1} , 与小主动臂连接处记为 C_{i2} ; 大主动臂和从动杆铰接处记为 B_{i1} , 三角架与从动杆铰接处记为 B_{i2} ; 动平台与从动杆铰接处分别记为 A_{i1} 和 A_{i2} ($i=1, 2, 3$)。在静平台中心处建立系统坐标系 xyz , 在动平台中心处建立动坐标系 $OXYZ$, 坐标轴 x 和 X 分别垂直于边 $C_{11}C_{12}$ 与 $A_{11}A_{12}$, z 轴竖直向上, 则机构整体关于 x 轴对称。

2 运动度分析

对于复杂多闭环耦合并联机构, 其自由度求解较为困难^[19-21]。所提 6 自由度 Delta 型机器人可以分成 3 组独立分支, 每组分支中含有 2 条相互耦合的运动支链。为便于分析, 定义由分支 1 拆分出的耦合支链分别为支链 u_1 和支链 u_2 , 在支链 u_2 的 C_{12} 点建立局部坐标系 $C_{12}U_2V_2W_2$, 坐标系的建立原则与图 4 中平行四边形坐标系相同, 如图 6 所示。设 A_{11} 、 B_{11} 和 C_{11} 坐标分别为 (X_{11}, Y_{11}, Z_{11}) 、 $(X_{12}, Y_{12},$

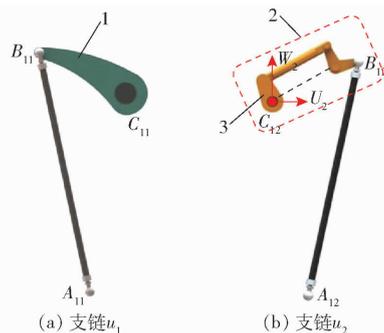


图6 含耦合节点的运动支链

Fig.6 Motion branch with coupling node

- 1. 大主动臂 2. 平行四边形机构 3. 小主动臂

其中

$$\begin{cases} E_{i1} = -c_{i1}k \\ F_{i1} = (c_{i1}c_{i1}^T + l_3^2 - l_4^2)/(2l_3) \\ G_{i1} = c_{i1}i\cos\varepsilon_i + c_{i1}j\sin\varepsilon_i \\ c_{i1}^T = f + d_{i1} - e_{i1} \end{cases}$$

式中 i —— x 轴的单位矢量

j —— y 轴的单位矢量

k —— z 轴的单位矢量

3.2 小主动臂所在支链分析

对于小主动臂所在的运动支链,动平台中心点 O 的位置矢量 f 可表示为

$$f + d_{i2} = e_{i2} + l_1 u_{i2} + l_2 v_{i2} + l_5 w_{i2} \quad (14)$$

其中

$$u_{i2} = u_{i1}$$

$$v_{i2} = T_i [\cos\psi_i \quad 0 \quad -\sin\psi_i]^T \quad (15)$$

$$d_{i2} = RT_i d_{i1} \quad (16)$$

$$e_{i2} = T_i e_{i1} \quad (17)$$

$$e_{i2} = [e \quad -a \quad 0]^T \quad d_{i2} = [d \quad -a \quad 0]^T$$

由式(14)可推导小主动臂所对应的位置逆解

$$\psi_i = 2\arctan \frac{E_{i2} \mp \sqrt{E_{i2}^2 - F_{i2}^2 + G_{i2}^2}}{F_{i2} + G_{i2}} \quad (18)$$

其中

$$\begin{cases} E_{i2} = -c_{i2}k \\ F_{i2} = (c_{i2}c_{i2}^T + l_2^2 - l_5^2)/(2l_3) \\ G_{i2} = c_{i2}i\cos\varepsilon_i + c_{i2}j\sin\varepsilon_i \\ c_{i2}^T = f + d_{i2} - e_{i2} - l_1 u_{i2} \end{cases}$$

小主动臂相对于静平台的输入转角为 φ_i , 由几何关系可知

$$\varphi_i = \lambda - \psi_i \quad (19)$$

综上所述,机器人位置逆解为

$$\begin{bmatrix} \theta_i \\ \varphi_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2\arctan \frac{E_{i1} \mp \sqrt{E_{i1}^2 - F_{i1}^2 + G_{i1}^2}}{F_{i1} + G_{i1}} \\ \lambda - 2\arctan \frac{E_{i2} \mp \sqrt{E_{i2}^2 - F_{i2}^2 + G_{i2}^2}}{F_{i2} + G_{i2}} \end{bmatrix} \quad (20)$$

4 运动空间分析

并联机构运动空间大小及其分布是表征其工作性能的基本指标^[22],为此提出一种搜索算法来预估6自由度Delta型机器人的运动空间。该算法的基本思想为:

(1)根据机器人样机设计的尺度参数,预先估计动平台在 x, y, z 坐标轴方向上所能到达的搜索范围。在柱面坐标系下,设搜索半径 r 为 $0 \sim 0.6$ m, 角度 ω 为 $0^\circ \sim 360^\circ$, z 为 $-1.2 \sim 0$ m, 其中 r_{\max} 为 0.6 m、 ω_{\max} 为 360° 、 z_{\max} 为 0 m。则 $x = r\cos\omega$ 、 $y = r\sin\omega$ 。为提高计算效率和保证搜索精度,将步长设为 $\Delta r = 0.02$ m,则在运动空间边界处会存在 $0 \sim 0.02$ m 的搜索误差,约为总搜索半径的 3.3% 。Delta机器人在操作中,一般要求动平台上的末端执行器在一规则区间内运动,通常取运动空间内一直径为 D , 高为

h 的圆柱体作为任务空间,所以边界误差会较小影响Delta机器人任务空间范围。

(2)确定机器人转角搜索范围。机器人球关节经测量存在 η 为 $-37.0^\circ \sim 37.0^\circ$ 的转角限制,则转动轴线 S 与水平方向的夹角极限分别为 $\eta_{\max} = 127.0^\circ$ 、 $\eta_{\min} = 53.0^\circ$,如图8所示。由于球关节处的转角极限,所以将动平台姿态参量 α, β, γ 的搜索范围限定在 $[-40.0^\circ, 40.0^\circ]$, 其中 α_0, β_0 和 γ_0 均为 -40.0° , $\alpha_{\max}, \beta_{\max}$ 和 γ_{\max} 均为 40.0° 。



(a) 球关节 (b) 极限夹角
图8 球关节及其极限夹角

Fig. 8 Ball joint and limit angle

(3)为更准确地描绘所提机器人的运动空间,引入边界条件。分别计算搜索点(包含位姿信息)所对应的6个主动臂输入转角及其从动杆连接的球关节角度。由于机器人结构存在干涉,主动臂转角约束条件为 $\theta_{\min} \leq \theta \leq \theta_{\max}$ 、 $\varphi_{\min} \leq \varphi \leq \varphi_{\max}$;球关节约束条件为 $\eta_{\min} \leq \eta \leq \eta_{\max}$ 。当满足所有边界条件后,该点作为运动空间点被保存于图像中。

图9为机器人可达工作空间的搜索过程。

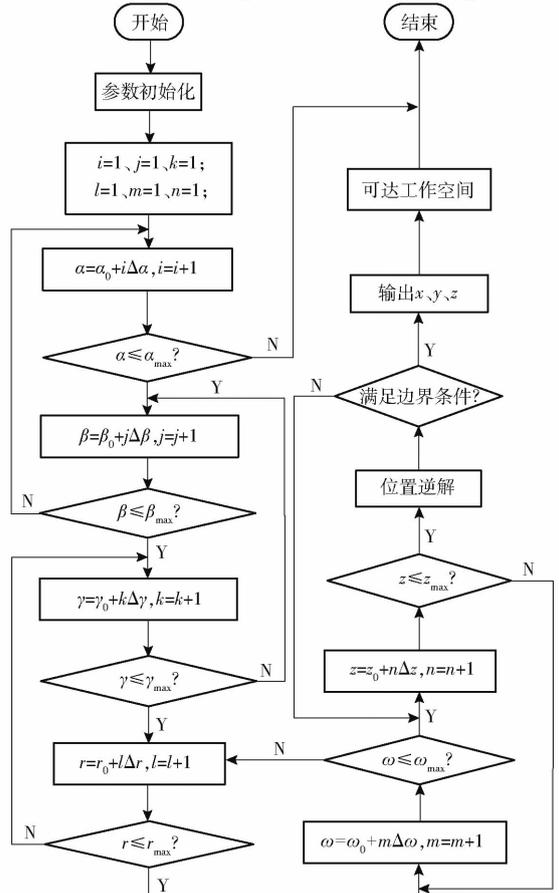


图9 搜索运动空间流程图

Fig. 9 Flow chart of workspace searching algorithm

表1为6自由度Delta型机器人概念样机的相关尺寸参数与边界条件。

表1 尺寸参数与边界条件

Tab.1 Scale parameters and boundary conditions

参数	数值
连杆长度 l_1	0.225
三角架长度 l_2	0.060
大主动臂长度 l_3	0.285
从动杆长度 l_4	0.850
小主动臂长度 l_5	0.070
边界条件/ $^\circ$	
θ_{\min}	-90.0
θ_{\max}	90.0
φ_{\min}	0
φ_{\max}	180.0
η_{\min}	53.0
η_{\max}	127.0

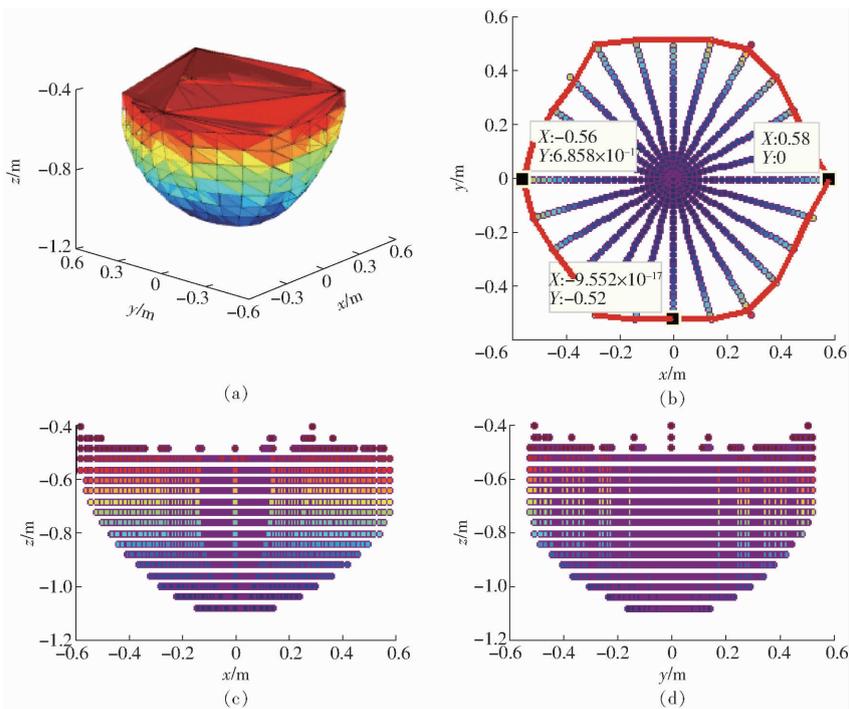


图10 6自由度Delta型机器人运动空间

Fig.10 Workspace of proposed 6-DOF Delta robot

为探究同一尺度参数的3自由度Delta机器人的运动范围,基于该搜索算法的基本思想,由于动平台无转动自由度,故将 α 、 β 、 γ 设为 0° ;由于每个分支只存在一条主动臂,故边界条件为主动臂转角为 $\theta_{\min} \leq \theta \leq \theta_{\max}$,球关节极限转角为 $\eta_{\min} \leq \eta \leq \eta_{\max}$ 。得到其运动空间如图11a所示,图11b为 $z = -0.60$ m平面的运动边界。

对比图10b,3自由度Delta机器人在 y 轴方向上的运动范围略小于所提机器人。由于动平台转角都为 0° 属于所提机器人的一种特殊位型,该位型下大主动臂所在支链位置逆解与3自由度Delta机器人位置逆解相同,小主动臂所在支链协同运动使所提机器人每条分支中2条从动杆始终保持

通过上述搜索算法,该尺度参数下机器人运动空间如图10所示。从图10a可看出,6自由度Delta型机器人运动空间可以近似为一个底面为抛物面的柱体。为更清楚表达运动空间的范围,在图10b~10d中分别给出了运动空间在 $x-y$ 、 $x-z$ 和 $y-z$ 平面内的截面图。从图10b~10d可以看出, x 轴方向上运动范围为 $-0.56 \sim 0.58$ m, y 轴方向运动范围为 $-0.52 \sim 0.52$ m,且在 $y-z$ 平面内运动空间是关于 $y=0$ (即 x 轴)对称。 z 轴方向上机器人运动范围为 $-1.10 \sim -0.40$ m,而在 $-0.74 \sim -0.54$ m范围内的运动直径更大,故选取 $z = -0.60$ m作为典型运动平面,并在图10b中描绘了在该平面内机器人运动空间的边界轮廓。

平行。故相同边界条件下,同一尺度参数的3自由度Delta机器人的运动空间是所提机器人运动空间的子集。

5 样机搭建与运动实验

结合表1尺寸参数,根据理论分析完成了工程样机的搭建,包括机器人本体和控制系统。选取4组典型位置进行多角度抓取实验,如图12所示。

通过样机运动实验验证该Delta机器人具有6个自由度,分别为平面内3个方向的移动和绕 x 、 y 、 z 轴方向的转动。并在表2给出4组抓取实验中各位姿点的理论值与测量值。

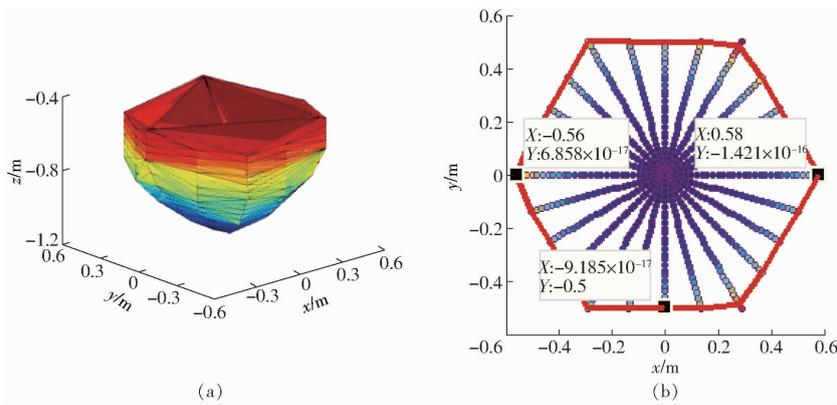


图 11 3 自由度 Delta 机器人运动空间

Fig. 11 Workspace of 3-DOF Delta robot

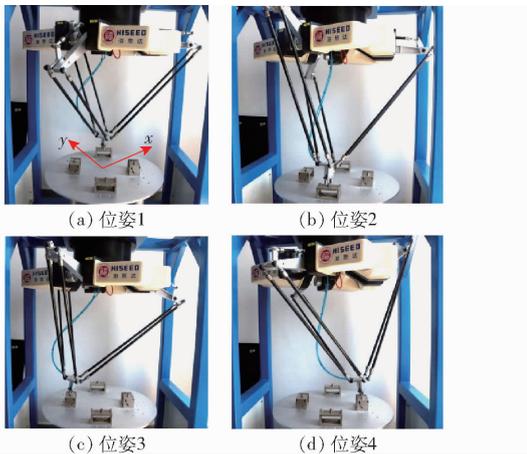


图 12 不同位姿抓取实验

Fig. 12 Grasping experiments of different positions

由表 2 可知,机器人运动位姿点的理论值与测量值接近,微小误差可能来源于机械结构装配误差和机器人关节间隙。

为验证运动空间搜索算法的分析结果,在 $z = -0.600\text{ m}$ 运动平面内将机器人末端分别运动到 x 、 y 轴方向的极限位置,如图 13 所示。实验测得该极限位置的空间坐标为 $(0.582, 0, -0.600)\text{ m}$ 、 $(0, 0.522, -0.600)\text{ m}$,误差在搜索步长范围内,与理论分析结果一致。

6 结论

(1)提出了一类 6 自由度 Delta 型机器人,运动自由度的提高使机器人能够完成生产线上物体的多

表 2 不同位姿理论值与测量值

Tab. 2 Theoretical and measured values of different positions and angles

	位姿 1	位姿 2	位姿 3	位姿 4
理论值	$(0.115, 0.200, -0.640)\text{ m}$ $(10.0^\circ, -5.0^\circ, 0^\circ)$	$(-0.115, -0.200, -0.640)\text{ m}$ $(-10.0^\circ, 5.0^\circ, 0^\circ)$	$(-0.153, 0.085, -0.640)\text{ m}$ $(6.0^\circ, 7.0^\circ, 8.0^\circ)$	$(0.153, -0.085, -0.640)\text{ m}$ $(-6.0^\circ, -7.0^\circ, 8.0^\circ)$
测量值	$(0.117, 0.118, -0.640)\text{ m}$ $(10.2^\circ, -4.9^\circ, -0.1^\circ)$	$(-0.116, -0.118, -0.640)\text{ m}$ $(-10.1^\circ, 4.8^\circ, 0^\circ)$	$(-0.151, 0.087, -0.640)\text{ m}$ $(5.8^\circ, 7.1^\circ, 8.1^\circ)$	$(0.152, -0.086, -0.640)\text{ m}$ $(-5.9^\circ, -7.2^\circ, 8.1^\circ)$

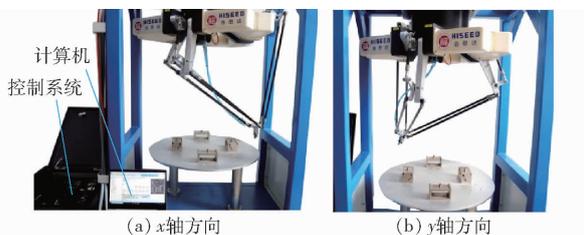


图 13 机器人运动极限位置

Fig. 13 Extreme position of Delta robot

杂多闭环耦合机构进行拆分,计算得到该机器人自由度,并建立位置逆解模型,为进一步研究轨迹规划提供了一定的理论基础。

(3)采用所提运动空间搜索算法,绘制了 Delta 型机器人的运动空间分布,并选取机器人典型运动平面进行运动实验,仿真与实验结果表明,该搜索算法具有较高的计算精度,同时,在相同尺度参数下,3 自由度 Delta 机器人运动空间是所提机器人工作空间的子集。

角度抓取、零件的多姿态装配等复杂操作任务。

(2)分析了 6 自由度 Delta 型机器人结构,对复

参 考 文 献

[1] BRINKER J, CORVES B, TAKEDA Y. Kinematic performance evaluation of high-speed Delta parallel robots based on motion/force transmission indices[J]. Mechanism and Machine Theory, 2018, 125: 111 - 125.

- [2] 倪鹤鹏, 刘亚男, 张承瑞, 等. 基于机器视觉的 Delta 机器人分拣系统算法[J]. 机器人, 2016, 38(1):49-55.
NI Hepeng, LIU Ya'nan, ZHANG Chengrui, et al. Sorting system algorithms based on machine vision for Delta robot[J]. Robot, 2016, 38(1): 49-55. (in Chinese)
- [3] 冯李航, 张为公, 龚宗洋, 等. Delta 系列并联机器人研究进展与现状[J]. 机器人, 2014, 36(3):375-384.
FENG Lihang, ZHANG Weigong, GONG Zongyang, et al. Developments of Delta-like parallel manipulators—a review[J]. Robot, 2014, 36(3): 375-384. (in Chinese)
- [4] KUO Y L. Mathematical modeling and analysis of the Delta robot with flexible links[J]. Computers & Mathematics with Applications, 2016, 71(10):1973-1989.
- [5] 梅江平, 臧家炜, 乔正宇, 等. 三自由度 Delta 并联机器人轨迹规划方法[J]. 机械工程学报, 2016, 52(19): 9-17.
MEI Jiangping, ZANG Jiawei, QIAO Zhengyu, et al. Trajectory planning of 3-DOF Delta parallel manipulator[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(19): 9-17. (in Chinese)
- [6] CHENG Hongtai, LI Wei. Reducing the frame vibration of Delta robot in pick and place application: an acceleration profile optimization approach[J]. Shock and Vibration, 2018:1-15.
- [7] CLAVEL R. Device for the movement and positioning of an element in space; USA, US4976582[P]. 1990-12-11.
- [8] 李玉航, 梅江平, 刘松涛, 等. 一种新型 4 自由度高速并联机器人动力尺度综合[J]. 机械工程学报, 2014, 50(19): 32-40.
LI Yuhang, MEI Jiangping, LIU Songtao, et al. Dynamic dimensional synthesis of a 4-DOF high speed parallel manipulator [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(19): 32-40. (in Chinese)
- [9] PIERROT F, COMPANY O. H4: a new family of 4-DOF parallel robots [C] // IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, IEEE, 1999.
- [10] LIU Songtao, HUANG Tian, MEI Jiangping, et al. Optimal design of a 4-DOF SCARA type parallel robot using dynamic performance indices and angular constraints[J]. ASME Journal of Mechanisms and Robotics, 2012, 4(3): 031005-1-031005-10.
- [11] WU Y, FU Z, XU J N, et al. Kinematic analysis of 5-DOF hybrid parallel robot[C] // International Conference on Intelligent Robotics and Applications. Springer International Publishing, 2015:153-163.
- [12] BOURI M, CLAVEL R. The linear Delta: developments and applications [C] // Robotics (ISR), 2010 41st International Symposium on and 2010 6th German Conference on Robotics (ROBOTIK). VDE, 2010.
- [13] MARTINI A, TRONCOSSI M, CARRICATO M, et al. Static balancing of a parallel kinematics machine with linear-Delta architecture: theory, design and numerical investigation[J]. Mechanism and Machine Theory, 2015, 90:128-141.
- [14] KELAI AIA R, COMPANY O, ZAATRI A. Multiobjective optimization of a linear Delta parallel robot[J]. Mechanism & Machine Theory, 2012, 50(2): 159-178.
- [15] 吴超宇, 钱小吾, 余伟, 等. 直线驱动型并联机器人工作空间分析与优化[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(1): 381-389.
WU Chaoyu, QIAN Xiaowu, YU Wei, et al. Workspace analysis and optimization of linear driven parallel robot [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(1): 381-389. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180148&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.01.048. (in Chinese)
- [16] PATEL J, MEHTA C, VARMA M, et al. Multi-purpose Delta robot design proposal [C] // National Conference on Emerging Trends in Engineering, Technology & Management, 2014.
- [17] BALMACEDA-SANTAMARIA A L, CASTILLO-CASTANEDA E, GALLARDO-ALVARADO J. A novel reconfiguration strategy of a Delta-type parallel manipulator[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2016, 13(1): 15.
- [18] LIU X J, WANG J, PRITSCHOW G. A new family of spatial 3-DOF fully-parallel manipulators with high rotational capability [J]. Mechanism & Machine Theory, 2005, 40(4):475-494.
- [19] 刘婧芳, 黄晓欧, 余跃庆, 等. 多环耦合机构末端件自由度计算的等效法[J]. 机械工程学报, 2014, 50(23):13-19.
LIU Jingfang, HUANG Xiaou, YU Yueqing, et al. Equivalent method of output mobility calculation for a novel multi-loop coupled mechanism[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(23): 13-19. (in Chinese)
- [20] 叶伟, 李秦川, 张克涛. 一种运动部分解耦的 2R2T 并联机构运动学与性能分析[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(1): 374-382.
YE Wei, LI Qinchuan, ZHANG Ketao. Kinematics and performance analysis of 2R2T parallel manipulator with partially decoupled motion[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(1): 374-382. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190143&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.01.043. (in Chinese)
- [21] 朱小蓉, 胡畅, 沈惠平, 等. 3T1R 并联机构降耦设计与分析[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(12):393-401.
ZHU Xiaorong, HU Yang, SHEN Huiping, et al. Design and analysis of structure coupling reduction on novel 3T1R parallel mechanism[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(12): 393-401. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20181247&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.12.047. (in Chinese)
- [22] 高秀兰, 鲁开讲, 王娟平. Delta 并联机构工作空间解析及尺度综合[J]. 农业机械学报, 2008, 39(5):146-149.
GAO Xiulan, LU Kaijiang, WANG Juanping. Workspace resolution and dimensional synthesis on Delta parallel mechanism [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(5): 146-149. (in Chinese)