

基于 TRIZ 理论的挤奶机器人末端执行器结构设计

胡海霞^a,常博斌^a,王成军^b,毕亮亮^a

(安徽理工大学 a. 机械工程学院; b. 人工智能学院,安徽 淮南 232001)

摘要:针对现有挤奶机器人末端执行器对牛乳头套杯过程中存在适应性差、工作效率低等问题,运用 TRIZ 理论设计一种气动式双夹持自适应的末端执行器。对末端执行器进行因果分析,得到末端执行器套杯效率低的根本原因;采用“技术矛盾”方法改善系统工程参数,设计出可微调的双夹持结构;建立“物-场模型”对末端夹持器进行优化设计。运用 MATLAB 软件验证末端执行器工作空间的合理性。研究表明:所设计的新型自适应双夹持末端执行器可满足挤奶机器人的快速套杯作业要求,提高了挤奶效率,为后期挤奶机器人开发与研制提供了参考依据。

关键词:挤奶机器人;TRIZ;双夹持结构;末端执行器;优化设计

中图分类号:S226.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2022)05-0159-04

Structure Design of End Effector of Milking Robot Based on TRIZ Theory

HU Haixia^a, CHANG Bobin^a, WANG Chengjun^b, BI Liangliang^a

(a. College of Mechanical Engineering; b. College of Artificial Intelligence, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: To improve the poor adaptability and low work efficiency in the process of cow nipple cupping by the existing milking robot end effector, a pneumatic double-clamping adaptive end effector is designed with TRIZ theory. Through the causal analysis of the end effector, the root cause of the low efficiency of the end effector cup is gained by “technical contradiction” method to improve the system engineering parameters and design fine-tunable double clamping structure. The “object-field model” is established to optimize the end holder. By MATLAB software, the rationality of end effector workspace is verified. The research results show that the designed new adaptive double-clamping end effector meets the requirements of the milking robot’s rapid cupping operation, which improves milking efficiency and provides a reference for the development and manufacture of milking robot at a later stage.

Keywords: milking robot; TRIZ; double clamping structure; end effector; optimized design

0 引言

随着经济快速发展,人们对乳制品的需求量大大增加,从而推动畜牧业发展。高效、智能挤奶机器人的引入是畜牧业发展的趋势^[1]。挤奶机器人能大大节省牧场日常的运营成本,提高牧场生产效率和奶源的整体品质。其中机器人的末端执行器在识别牛乳头位置、姿态、套杯和牛乳头清理消毒过程中发挥了至关重要的作用,其工作性能决定着挤奶机器人整体的稳定性和工作效率^[2]。

挤奶机器人套杯的方式为单夹持式末端执行器 ProFlex 挤奶机器人,该机器人采用 6 轴工业级机械臂,1 次只能对 1 个牛乳房进行工作,1 次完整的挤奶作业需要重复 4 次夹取套杯,导致工作效率低下^[3]。而对于具有 3 自由度的 LELY 挤奶机器人而言,整体结构简单,其末端执行器直接集成 4 个套杯,挤奶作业中可同时对 4 个乳房进行套杯^[4],但由于每个奶杯缺乏微调装置,对不同姿态和间距的牛乳房适应能力差,导致套杯效率低。因此,设

计一款自适应强、工作效率高的夹持式末端执行器具有现实意义。

针对现有的挤奶机器人末端执行器中的不足之处,基于 TRIZ 理论对机器人末端执行器进行创新设计,得出一种可微调、双夹持的气动夹持式末端执行器结构。运用 MATLAB 软件对末端执行器工作空间进行分析,验证其结构的合理性。

1 问题分析

1.1 问题描述

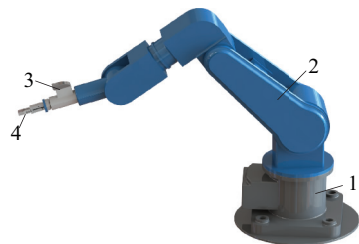
现有夹持式挤奶机器人的主要工作部件包括机器人底座、机械臂、末端执行器等。采用串联方式进行连接,在末端执行器上安装夹持器及激光定位装置,如图 1 所示。

挤奶机器人一般工作流程如图 2 所示。现有单夹持式挤奶机器人只能依次对乳头进行套杯工作,因此完成 1 头奶牛的挤奶工作,需要对奶牛进行 4 次套杯工作,导致

基金项目:安徽省教育厅高校协同创新项目(GXXT2019018)

第一作者简介:胡海霞(1979—),女,黑龙江嫩江人,副教授,研究生导师,博士,研究方向为复合材料力学性能,先进制造技术。

挤奶流程长,效率低。单台挤奶机器人无法满足牧场的需求,需采购一定数量的挤奶机器人,牧场的设备成本也随之增加。



1—机器人底座;2—机械臂;3—激光定位装置;4—夹持器。

图1 挤奶机器人结构

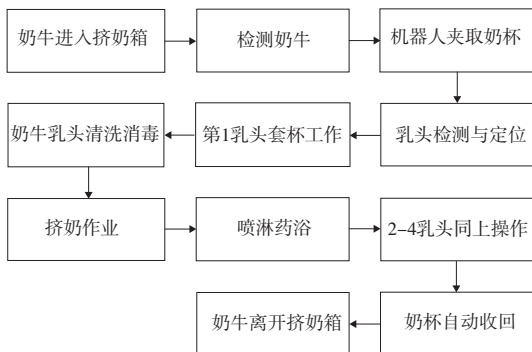


图2 挤奶机器人工作流程

1.2 因果轴分析

因果轴分析的目的是发现问题表面之下的真正关联,通过分析问题产生的根本原因与结果之间的逻辑链,找出其中的薄弱环节,从而得到解决问题的突破口^[5-6]。图3为因果轴分析图。

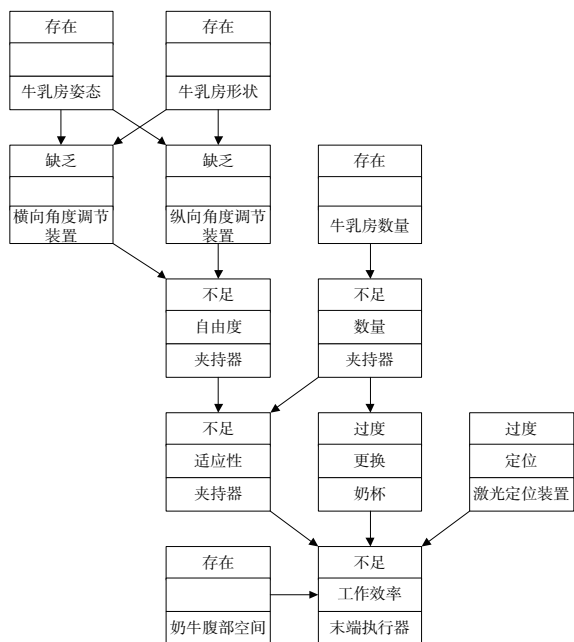


图3 因果轴分析图

根据图3因果轴分析可知,挤奶机器人工作效率低的主要原因是:挤奶机器人末端执行器上夹持器数量不足、夹持器自适应能力不足、奶杯需要频繁更换。

2 运用 TRIZ 理论解决问题

2.1 基于技术矛盾对末端执行器创新设计

通过因果轴分析可知,传统挤奶机器人的末端执行器缺乏针对不同位姿牛乳房的微调装置,夹持器数量过少导致工作效率低下。解决上述问题需要设计一种工作效率高、自适应度高的末端执行器结构。

将上述得到的根本原因归纳为适应性及多用性和设备复杂性之间的矛盾以及时间损失和结构的稳定性之间的矛盾。根据改善参数和恶化参数查找阿奇舒勒(G.S.Altshuler)矛盾矩阵表得到发明原理,如表1所示。

表1 矛盾矩阵

改善参数	恶化参数	
	36 设备的复杂性	13 结构的稳定性
35 适应性及多用性	15, 29, 37, 28	35, 30, 14
25 时间损失	6, 29	35, 3, 22, 5

根据实际情况选择适合本设计的发明原理,发明原理5(组合原理)以及发明原理15(动态化原理),如表2所示。

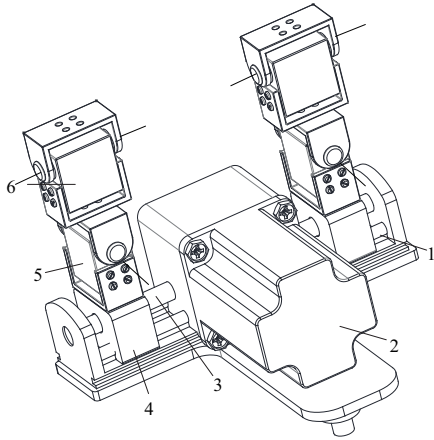
表2 矛盾解决原理

序号	发明原理	原理描述
15	动态化	1. 调整物体使其工作阶段达到最优状态 2. 分割物体,各部分可以改变相对位置 3. 如果物体是静止的,使其移动或可动
5	组合	1. 在空间上将相同的物体或相关操作加以组合 2. 在时间上将相同或相关的操作进行合并

创新发明原理的应用:结合组合原理的第1条将现有的单个夹持器组合起来,形成双夹持结构。当检测到奶牛进入挤奶箱后,挤奶机器人开始工作,末端执行器可以一次性夹取两个套杯对牛乳头进行套杯操作。再结合动态化原理的第3条,在两个夹持器的底端加装两个角度调节装置和一个丝杠滑轨装置。两个角度调节装置可以分别实现夹持器 x 、 y 轴方向的角度微调。丝杠滑轨装置左右两边的丝杠分别是左旋和右旋,通过电机转动可调节两夹持器间距。在夹持器夹取套杯运动到大致位置时,通过夹持器底端的角度调节装置和丝杠滑轨机构对夹持器进行微调,改善夹持器对不同位姿、间距牛乳头的适应能力,提高对牛乳头的套杯率。增加的调节装置如图4所示。夹持器的相关参数如表3所示。

2.2 物-场分析

物-场分析法是一种具备3个必要元素的系统模型,从物质和场的角度进行分析,构造出最小技术系统的理论与方法^[7]。



1—右旋丝杠;2—驱动电机;3—左旋丝杠;4—丝杠滑块;
5—纵向角度调节舵机;6—横向角度调节舵机。

图4 调节装置

表3 夹持器的参数表

参数名称	参数值
夹持器负载/N	≥20
夹持器质量/kg	≤1.4
夹持器长×宽×高/mm	113×67×40
夹取奶杯轴向误差/mm	≤1
闭合夹持力/N	≥34
奶杯尺寸/mm	半径 15,高度 120

末端执行器上的夹持器以电机作为驱动源,夹持过程中可以实现较高的精度控制,但挤奶机器人日常挤奶的环境较为潮湿,长期作业对电器元件精度产生影响从而导致夹取奶杯松动。这不仅影响挤奶机器人整体的工作效率,还会在套杯过程中对奶牛的乳头造成伤害。在夹取作业中,夹持器的对象是奶杯。因此,可以把奶杯看作物质 S_1 ,把夹持器看作物质 S_2 , S_2 在电场中对 S_1 精度控制不足。夹取系统物-场模型如图 5 所示。

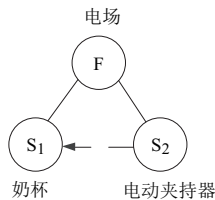


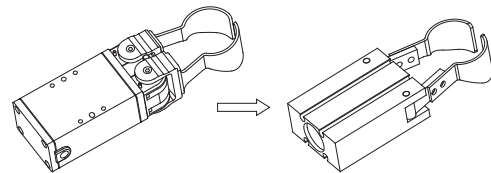
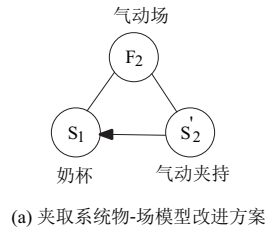
图5 夹取系统物-场模型

由夹取系统物-场模型可得,以电力为动力源的夹持器在潮湿环境长期使用后对奶杯抓取过程中产生了精度控制不足的问题。对于这种效应不足的完整模型,参考物-场模型一般解,提出三种解法。

- 1)用另外一种场 F_2 替代原来的场 F ;
- 2)增加另一个场 F_2 来强化有效场;
- 3)引入第三种物质 S_3 并增加另外一个场 F_2 来强化有用效用。

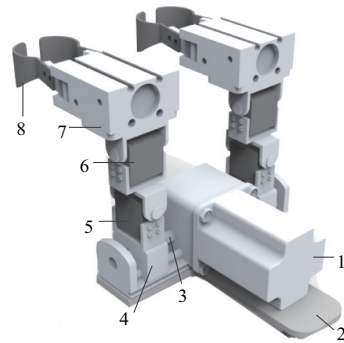
综合考虑三种解法,选择第一种解法思路,用一个新的场来代替原来的场。气动场以压缩空气为工作介质,利用压缩气体的膨胀作用,把压力能转换为机械能,实现驱动夹持器的效果。气动夹持器的夹持对象单一,可通过校核调整达到稳定夹持的效果;气动夹持器的结构简单,对潮湿工况的适应性更好且反应速度更快,缩短了作业时间,提高了工作效率。气动夹持器的动力是通过气管传导,动力源不需要集中在夹持器上,相对于电动夹持器更加轻便,只需增加空气压缩机作为动力源。同时气管应做好保护措施,避免在套杯作业中因气管漏气而发生危害事故。

图 6 为夹取系统优化方案,采用气动夹持器代替电动夹持器,可以更好地适应上述复杂环境对夹持器的影响,提高产品的使用寿命。图 7 为改进后的末端执行器模型图。



(a) 夹取系统物-场模型改进方案
(b) 电动夹持器改为气动夹持器简图

图6 夹取系统优化方案



1—伺服电机;2—底板;3—丝杠;4—丝杠滑块;
5—纵向角度调节舵机;6—横向角度调节舵机;
7—气动夹持器;8—弹性夹片。

图7 末端执行器模型

3 运动学分析

3.1 运动学 D-H 法

$D-H$ 法的基本思想是通过坐标系建立相邻杆件之间的关系,并以四阶齐次矩阵的形式进行表示,从而建立运动学方程^[8],相邻杆件齐次矩阵如下:

$${}^{i-1}_i T = \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ s\theta_i c\alpha_{i-1} & c\theta_i c\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1} & -d_i s\alpha_{i-1} \\ s\theta_i s\alpha_{i-1} & c\theta_i s\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1} & d_i c\alpha_{i-1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

3.2 末端执行器正运动学分析

末端执行器的三维模型,描述末端执行器各个关节位置关系建立末端执行器单侧各连杆坐标系,如图 8 所示。通过坐标齐次变换建立相邻连杆坐标系的位置关系,再以矩阵形式表示。

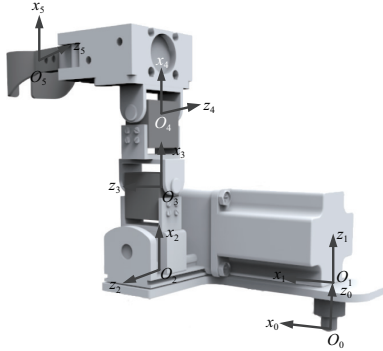


图 8 末端执行器单侧位姿坐标系图

由图 7 可知,末端执行器的位置和工作空间主要受底部丝杠滑轨运动滑块、运动副转角(转动副)等因素的限制。

$$\begin{cases} d_{\min} \leq d_i \leq d_{\max} \\ \theta_{\min} \leq \theta_i \leq \theta_{\max} \end{cases} \quad (2)$$

式中: d_i 表示丝杠滑块在轨道上的位置; d_{\min} 和 d_{\max} 分别表示轨道滑块的最小和最大距离的变化范围; θ_i 表示各支链中旋转关节(转动副)的转角; θ_{\min} 和 θ_{\max} 表示转动副的最小和最大转角。由图 8 可知,末端执行器两侧的夹持器相对称,只需对一侧求解即可。一侧的夹持器由 1 个移动关节和 2 个转动关节组成。杆件 1 绕坐标轴 O 的 z_0 轴旋转 θ_1 ,绕 x_0 轴旋转 α_1 ;杆件 2 沿坐标系 1 的 z_1 轴平移 d_2 ;杆件 3 绕坐标轴 2 的 z_2 轴旋转 θ_3 ,绕 x_2 轴旋转 α_3 ;杆件 4 绕坐标轴 3 的 z_3 轴旋转 θ_4 ,绕 x_3 轴旋转 α_4 ;杆件 5 沿坐标系 4 的 z_4 轴平移 52 mm;坐标系 5 在夹片的中心位置。根据图 9 建立的末端执行器单侧位姿坐标系图及设计参数建

$${}^0_5 T = \begin{bmatrix} 0 & -c_1 c_4 - s_1 s_3 s_4 & c_3 s_1 & a_1 c_1 + c_1 d_3 - d_2 s_1 - a_4 (c_1 s_4 - c_4 s_1 s_3) + c_3 d_5 s_1 + a_3 s_1 s_3 \\ 0 & c_1 s_3 s_4 - c_4 s_1 & -c_1 c_3 & c_1 d_2 + a_1 s_1 + d_3 s_1 - a_4 (s_1 s_4 + c_1 c_4 s_3) - c_1 c_3 d_4 - c_1 c_3 d_5 - a_3 c_1 s_3 \\ 0 & -c_3 s_4 & -s_3 & a_2 + d_1 + a_3 c_3 - d_4 s_3 - d_5 s_3 + a_4 c_3 c_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_x & O_x & a_x & p_x \\ n_y & O_y & a_y & p_y \\ n_z & O_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = [n \ o \ a \ p] \quad (3)$$

式中:矩阵前 3 列表示末端执行器工作时的姿态;第 1 列为法向矢量;第 2 列为方位矢量;第 3 列为接近矢量;最后一列表示末端执行器夹持奶杯的工作位置。

3.3 末端执行器工作空间分析

通过正运动学分析得到末端执行器上工作点相对基坐标系的位置方程。利用 MATLAB 中的 Rand() 函数生

成一系列的随机数列,再利用这个随机数列对每一个关节变量取相应的步长: $(\theta_i^{\max} - \theta_i^{\min}) \text{Rand}(N, 1)$; $(d_i^{\max} - d_i^{\min}) \text{Rand}(N, 1)$ 。再通过随机的步长生成关于关节变量的随机值。

$$\theta_i = \theta_i^{\min} + (\theta_i^{\max} - \theta_i^{\min}) \text{Rand}(N, 1) \quad (4)$$

$$d_i = d_i^{\min} + (d_i^{\max} - d_i^{\min}) \text{Rand}(N, 1) \quad (5)$$

(下转第 166 页)

立 $D-H$ 参数表,如表 4 所示。

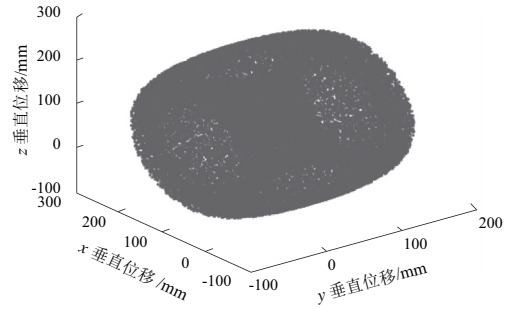


图 9 末端执行器三维工作空间

表 4 $D-H$ 参数表

杆件 n	连杆长度/ mm	关节距离/ mm	连杆扭角/ ($^\circ$)	关节转角/ ($^\circ$)	变量变化 范围
1	0	10	0	θ_1	$-90^\circ \sim 90^\circ$
2	99	d_2	-90	-90	29~59 mm
3	68	0	-90	θ_3	$-50^\circ \sim 0^\circ$
4	0	47	-90	θ_4	$-60^\circ \sim 60^\circ$
5	-117	52	0	0	0

将表 4 中的数据代入式(1)得到末端执行器各坐标的变换矩阵:

$${}^0_1 T = \begin{bmatrix} c_1 & -s_1 & 0 & 0 \\ s_1 & c_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, {}^1_2 T = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & a_2 \\ 0 & 0 & 1 & d_2 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^2_3 T = \begin{bmatrix} c_3 & -s_3 & 0 & a_2 \\ 0 & 0 & 1 & d_3 \\ -s_3 & -c_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, {}^3_4 T = \begin{bmatrix} c_4 & -s_4 & 0 & a_3 \\ 0 & 0 & 1 & d_4 \\ -s_4 & -c_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^4_5 T = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & a_4 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

式中: $c_n = \cos\theta_n$; $s_n = \sin\theta_n$ 。

故末端执行器工作位点相对于基座的位姿表达式:

$${}^0_5 T = {}^0_1 T {}^1_2 T {}^2_3 T {}^3_4 T {}^4_5 T$$

5 结语

本研究简述了双目视觉三维重建的基本理论,介绍了 ICP 配准的思路和算法。结合机器人实际抓取场景对比验证了传统 ICP 精配准算法和基于 KD-Tree 数据结构来优化的点云配准算法。从点云配准结果明显看出,优化的 ICP 配准算法,缩短了特征点匹配时间,减少了迭代次数,避免局部错误收敛,提升了代码执行效率,同时也控制了点云配准的误差。

参考文献:

- [1] 程远. 三维重建中的点云拼接算法研究[D]. 太原:中北大学,2017.
- [2] 龙超. 基于 Kinect 和视觉词典的三维 SLAM 算法研究[D]. 杭州:浙江大学,2016.
- [3] 杨军建. 点云数据处理系统设计与实现[D]. 抚州:东华理工大学,2016.
- [4] 鄢武. 基于 ROS 和点云库的室内三维物体识别与姿态估计[D]. 广州:广东工业大学,2016.
- [5] 王维,张丹,胡曾一震,等. 面向 AR 辅助维修的 3D 物体识别技术[J]. 机械制造与自动化,2020,49(3):155-158.
- [6] 王宪伦,陈壮,崔玉霞. 结构光非接触式 TCF 标定方法研

究[J]. 电子测量与仪器学报,2019,33(1):135-140.

- [7] DISCHER S, RICHTER R, DÖLLNER J. Concepts and techniques for web-based visualization and processing of massive 3D point clouds with semantics[J]. Graphical Models, 2019, 104:101036.
- [8] LAMINE T M, TAWSIF G, PAUL C, et al. CICIP: cluster iterative closest point for sparse-dense point cloud registration[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2018, 108:66-86.
- [9] DOS SANTOS J G Jr, SILVADOMONTE LIMA JP. Particle swarm optimization for 3D object tracking in RGB-D images[J]. Computers & Graphics, 2018, 76:167-180.
- [10] 王丽燕,胡玲,祖洪飞,等. UR10 工业机械臂位置精度及可靠性分析[J]. 现代制造工程,2020(9):46-52.
- [11] 杨永涛. 三维离散点云数据处理关键技术研究[D]. 秦皇岛:燕山大学,2017.
- [12] 杨飏,李三宝,王力. 基于正态分布变换与迭代最近点的快速点云配准算法[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(15):91-95.
- [13] KIM J, CROFTEA. Online near time-optimal trajectory planning for industrial robots[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2019, 58:158-171.

收稿日期:2021-07-12

(上接第 162 页)

式中: θ_i^{\min} 、 θ_i^{\max} 、 d_i^{\min} 、 d_i^{\max} 表示关节变量的上、下限; N 表示随机次数, N 取值为 10 000。

将得到的 N 个 θ_i^{\min} 、 θ_i^{\max} 、 d_i^{\min} 、 d_i^{\max} 随机值代入到 0T 矩阵中的对应列,得到 N 个坐标点的随机值,这些点在空间中的分布就是所求末端执行器的工作空间。利用 MATLAB 将随机点导入得到单侧末端执行器的空间云,得到单侧末端执行器的工作空间如图 9 和图 10 所示。该图形为末端执行器工作位点可达点的集合,在 $-55 \text{ mm} < x < 160 \text{ mm}$ 、 $-30 \text{ mm} < y < 230 \text{ mm}$ 、 $-100 \text{ mm} < z < 250 \text{ mm}$ 。

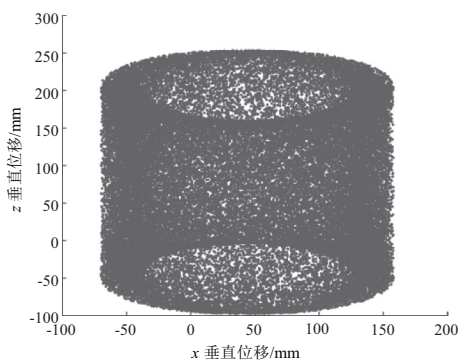


图 10 末端执行器二维 xOz 工作空间

已知中国和史坦牛乳房的形体姿态特征,乳头间距范围为 $8 \sim 12 \text{ cm}$;乳头长度范围为 $6.5 \sim 8.5 \text{ cm}$;乳头直径范围为 $2.0 \sim 2.5 \text{ cm}$ 。由图 9、图 10 得到的数据可知,挤奶机器人在进行挤奶工作时,末端执行器的执行位能实现对不同牛乳房位姿全覆盖,满足挤奶作业要求。

4 结语

1) 本文运用 TRIZ 理论中的因果分析法和矛盾矩阵及物-场模型对现有的挤奶机器人末端执行器进行分析,得出了一种新型气动式自适应双夹持的末端执行器,该执行器具有双夹持和微调节功能,满足了不同牛乳房间距和位姿的调节要求,提高了末端执行器的适应性和挤奶工作效率。

2) 利用 MATLAB 仿真证明挤奶机器人末端执行器工作范围满足要求,验证了结构设计的合理性。

参考文献:

- [1] WINNICKI S, ROMANIUK W, MIELCAREK-BOCHENSKA P, et al. Efficiency of milking cows using robot in a large herd[J]. Agricultural Engineering, 2019, 23(4):87-101.
- [2] 李源源,许楨子,陈蕾. 我国挤奶设备的应用现状与发展分析[J]. 农业科技与装备, 2013(9):77-78.
- [3] 于亚君. 挤奶机器人结构设计及运动性能分析[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2016.
- [4] JOHN A J, CULLEN B R, OLUBOYEDE K, et al. The effect of pasture quantity temporal variation on milking robot utilization[J]. Journal of Dairy Science, 2019, 102(3):2551-2559.
- [5] 王传友. TRIZ 新编创新 40 法及技术矛盾与物理矛盾[M]. 西安:西北工业大学出版社,2010.
- [6] CAVALLUCCI D, WEILL R D. Integrating Altshuller's development laws for technical systems into the design process[J]. CIRP Annals, 2001, 50(1):115-120.
- [7] 潘承怡,姜金刚. TRIZ 理论与创新设计方法[M]. 北京:清华大学出版社,2015.
- [8] 勾文浩,袁立鹏,宫赤坤,等. 基于足端轨迹的仿生四足机器人运动学分析与步态规划[J]. 现代制造工程,2017(7):37-41.

收稿日期:2021-06-08