

农业机器人新型肘关节的静力学性能分析

崔冰艳^{1,2}, 金振林^{1*}

(1. 燕山大学机械工程学院, 秦皇岛 066004; 2. 河北农业大学海洋学院, 秦皇岛 066003)

摘要: 为了提高农业自动化程度, 改善农业机器人的通用性与适应性, 提高农业机器人工作时的承载能力和利用率, 该文提出一种基于二自由度正交球面并联机构的农业机器人新型肘关节。新型肘关节由 2 条支链组成, 其动平台相对于机架具有 2 个转动自由度。新型肘关节与其它机器人的肘关节相比, 具有良好的运动性能和较大的工作空间。对新型肘关节进行静力学性能分析, 首先采用虚功原理的方法建立新型肘关节的静力学传递方程, 该方法简化了肘关节的静力学计算过程; 其次, 利用矩阵理论中的范数知识, 将力雅克比矩阵引入到静力学性能评价指标中, 定义了肘关节的静力学力矩传递性能评价指标和力矩输入均衡性评价指标, 分析了肘关节的静力学特性, 并绘制了肘关节的静力学性能评价指标在工作空间内的性能图谱。分析结果表明, 农业机器人新型肘关节的力矩传递性能指标和力矩输入均衡性能指标都呈对称分布, 静力学力矩传递性能随着转角的增大而降低, 在初始位置附近约 50% 的工作空间内具有良好的静力学特性和运动稳定性。该研究为农业机器人新型肘关节的优化设计提供参考。

关键词: 农业工程, 机器人, 静力学分析, 肘关节, 力矩性能评价指标

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2011.03.023

中图分类号: TP242.6

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2011)-03-0122-04

崔冰艳, 金振林. 农业机器人新型肘关节的静力学性能分析[J]. 农业工程学报, 2011, 27(3): 122-125.

Cui Bingyan, Jin Zhenlin. Analysis of statics performance for a novel elbow joint of agricultural robot[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(3): 122-125. (in Chinese with English abstract)

0 引言

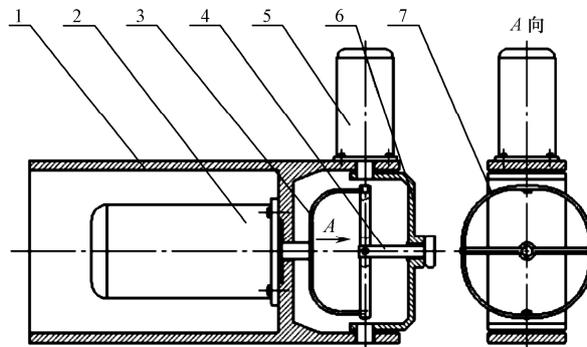
20 世纪 90 年代, 农业机器人研究才得到国内外学者的重视^[1-4]。农业机器人由于受工作对象、工作环境的复杂影响, 发展比较缓慢。而近年来国内外的很多学者将并联机构应用到机器人中, 主要做为肩^[5-6]、腕^[7]、髋^[8]、腰^[9]关节和肘关节^[10-11]。这些关节结构具有结构紧凑, 运动灵活等特点, 非常适合做农业机器人的关节机构。

静力学分析是机器人设计的基础, 可以确定力的传递特性, 进而为机构的结构尺寸参数设计提供依据^[12]。针对机器人的静力传递特性, 已有学者进行了一些研究。Gosselin^[13]建立了反映静力传递特性的刚度映射。马履中等^[14]采用与“摩擦圆理论”分析法相似的力分析方法, 分析了全柔性并联机器人机构的静力学问题。李智国等^[15]分析了机器人采摘中番茄力学特性与机械损伤的关系。目前, 对于农业机器人静力学性能分析的文章较少, 为了研究农业机器人静力学的性能, 本文提出了一种农业机器人新型肘关节, 根据其结构特点, 推导了肘关节的位置反解方程, 建立了肘关节的静力学传递方程, 定义了力矩性能评价指标和力矩输入均衡性能评价指标, 并

对其进行了分析, 绘制了在工作空间内的力学性能评价指标图谱。

1 肘关节的结构模型

农业机器人新型肘关节^[10]的二维结构图如图 1 所示。该农业机器人新型肘关节以 2 自由度并联机构为主体, 含有两个驱动电机, 驱动电机固定在肘关节的机架上, 电机 2 驱动小臂连接件转动; 电机 1 驱动 U 形件带动环状件转动; 肘关节的末端执行器, 通过小臂连接件并与环状件通过转动副连接在一起。肘关节的末端执行器具有 2 个转动自由度, 在末端执行器运动平台中心位置可以安装采摘手获, 喷洒装置等。这种农业机器人新型肘



1. 肘关节机架 2. 电机 1 3. U 形件 4. 末端执行器 5. 电机 2 6. 小臂连接件 7. 环状件

图 1 农业机器人新型肘关节的二维图

Fig.1 Two-dimensional drawing of novel elbow joint of agricultural robot

收稿日期: 2010-04-20 修订日期: 2010-07-01

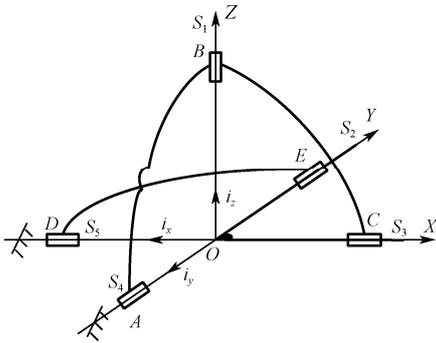
基金项目: 机械系统与振动国家重点实验室开放课题基金资助项目 (MSV-2010-24)

作者简介: 崔冰艳 (1978-), 女, 博士生 (讲师), 主要从事机器人关节研究。秦皇岛 燕山大学机械工程学院, 066004. Email: bingyan_cui@yahoo.cn
*通信作者: 金振林 (1962-), 男, 教授, 博士研究生导师, 主要从事并联机器人理论与应用技术方面的研究。秦皇岛 燕山大学机械工程学院, 066004. Email: zljjin@ysu.edu.cn

关节具有灵活的转向，适合安装在复杂的农业机器人上。

为了便于分析，将肘关节二维图简化为正交球面两自由度机构简图如图 2 所示，新型肘关节并联机构可简化为空间球面 5 杆机构，5 根杆件通过 5 个转动副构成 2 条支链，每个转动副的轴线都相交于球心 O ，由机构简图可知该结构为正交形式，弧 AB 、 BC 和 DE 所对的圆心角为 90° ，杆 COE 为一个直角杆件。该并联机构可动构件上的点都被约束在机构中心至该点的球面上。

建立固定坐标系： $O-XYZ$ ， X 轴沿 OC 所在的轴线由 O 指向 C ， Y 轴沿 OE 所在的轴线由 O 指向 E ， Z 轴沿 OB 所在的轴线由 O 指向 B ， S_1 为沿 OB 的单位矢量， S_2 为沿 OE 的单位矢量， S_3 为沿 OC 的矢量。 $O-i_x i_y i_z$ 为动坐标系。



注： S_1 为沿 OB 的单位矢量， S_2 为沿 OE 的单位矢量， S_3 为沿 OC 的矢量。 $O-i_x i_y i_z$ 为动坐标系

图 2 新型肘关节的机构简图

Fig.2 Structure of a novel elbow joint

2 静力学位置反解

已知该肘关节的动平台姿态变化角为 α 、 β ，输入转角 ε_1 、 ε_2 。采用矢量解析法求解肘关节的位置反解。根据转换矩阵的变化关系^[16]可以推出动平台的姿态矩阵为

$$R = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ \sin \alpha \sin \beta & \cos \alpha & -\sin \alpha \cos \beta \\ -\cos \alpha \sin \beta & \sin \alpha & \cos \alpha \cos \beta \end{bmatrix} \quad (1)$$

在机构简图中， S_2 在固定坐标系下的坐标为

$$S_2 = R(0 \quad -1 \quad 0)^T = (0 \quad -\cos \alpha \quad \sin \alpha)^T \quad (2)$$

根据该肘关节的机构特点，当电机转动输入角度为 ε_1 时，而 S_2 又可表示为输入角 ε_1 的关系式， S_2 为

$$S_2 = (0 \quad -\cos \varepsilon_1 \quad \sin \varepsilon_1)^T \quad (3)$$

由式 (2) 和式 (3)，得到

$$\varepsilon_1 = \alpha \quad (4)$$

S_3 在固定坐标系下的坐标为

$$S_3 = R(1 \quad 0 \quad 0)^T = (\cos \beta \quad \sin \alpha \sin \beta \quad -\sin \alpha \cos \beta)^T \quad (5)$$

S_1 在固定坐标系下的坐标为输入角 ε_2 的关系式为

$$S_1 = (\sin \varepsilon_2 \quad 0 \quad \cos \varepsilon_2)^T \quad (6)$$

由肘关节本身的几何关系，推出

$$S_1 \cdot S_3 = 0 \quad (7)$$

得

$$\varepsilon_2 = a \tan 2(\cos \alpha \sin \beta, \cos \beta) \quad (8)$$

该肘关节的位置反解方程为

$$\begin{cases} \varepsilon_1 = \alpha \\ \varepsilon_2 = a \tan 2(\cos \alpha \sin \beta, \cos \beta) \end{cases} \quad (9)$$

位置反解方程式 (9) 的两端对时间求导，推出肘关节的运动学方程^[16]为

$$\omega = J\mu \quad (10)$$

式中， ω 为输出速度，rad/s； μ 为输入速度，rad/s； J 为速度雅克比矩阵。

则速度雅克比矩阵 J 为

$$J = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{\sin \varepsilon_1 \sin \varepsilon_2 \cos \varepsilon_2}{\sin^2 \varepsilon_2 + \cos^2 \varepsilon_1 \cos^2 \varepsilon_2} & \frac{\cos \varepsilon_1}{\sin^2 \varepsilon_2 + \cos^2 \varepsilon_1 \cos^2 \varepsilon_2} \end{pmatrix} \quad (11)$$

3 静力学性能分析

3.1 静力学传递方程

根据虚功原理，当时关节仅受外力矩作用，经过任意构件的虚位移所做的虚功为零，肘关节的各个构件处于静力平衡状态。设 $\tau = (\tau_1 \quad \tau_2)^T$ 是肘关节的关节驱动力矩矢量， $M = (M_x \quad M_y)^T$ 是肘关节对应的末端执行器所受的外力矩矢量。令肘关节末端执行器的虚转角为 $\delta\theta$ ， $\delta\theta = (\delta\theta_1 \quad \delta\theta_2)^T$ ，输入驱动关节的虚转角为 $\delta\varepsilon$ ， $\delta\varepsilon = (\delta\varepsilon_1 \quad \delta\varepsilon_2)^T$ 。根据虚功原理，除约束力以外，所有的外力矩所做的功之和^[17]为

$$\tau \cdot \delta\varepsilon - M \cdot \delta\theta = 0 \quad (12)$$

由于肘关节的虚转角 $\delta\varepsilon$ 和 $\delta\theta$ 并非独立，要满足几何约束条件，两者之间的几何约束由雅克比矩阵 J 所决定，应满足

$$\delta\theta = J \delta\varepsilon \quad (13)$$

综合式 (12) ~ 式 (13)，建立肘关节的静力学传递方程为

$$M = G \tau \quad (14)$$

式中， G 为肘关节的力雅比矩阵，而

$$G = (J^{-1})^T \quad (15)$$

3.2 静力学性能评价指标

从肘关节的静力学传递方程式 (14) 可以看出，肘关节在运动时，力雅克比矩阵 G 决定了输入力矩与输出力矩的大小，根据矩阵理论中范数的内容，对式 (14) 取 2 范数，即

$$\|M\|^2 = \tau^T G^T G \tau \quad (16)$$

设输入量为单位量，则

$$\|\tau\| = \tau^T \tau = 1 \quad (17)$$

引用拉格朗日算子

$$L_M = \tau^T G^T G \tau - \lambda_M (\tau^T \tau - 1) \quad (18)$$

式中， λ_M 为拉格朗日乘子。

根据式 (18)，输出力矩的极值条件为

$$\frac{\partial L_M}{\partial \tau} = 0: G^T G \tau - \lambda_M \tau = 0 \quad (19)$$

式中, λ_M 也为 $G^T G$ 的特征值。

由式 (19), 推出输出力矩 M 的极值为

$$\|M\|_{\max} = \sqrt{\lambda_{M \max}}, \|M\|_{\min} = \sqrt{\lambda_{M \min}} \quad (20)$$

对于某一位姿, 可以根据极值公式求出肘关节末端承载力矩的最大值和最小值。

在定姿态工作空间内, 分析肘关节的承载能力, 利用极值定义肘关节的静力学力矩传递性能评价指标为

$$K_M = \|M\|_{\min} \quad (21)$$

令肘关节的回转半径 $R=100 \text{ mm}$, 综合式 (11) 及式 (21), 绘制了肘关节的力矩传递性能指标 K_M 值在工作空间内的分布, 如图 3 所示。从图 3 中分析, K_M 值越大, 肘关节在该姿态下的力矩传递性能越好。肘关节的力矩传递性能呈对称分布, 在初始位置附近时, K_M 越大, 肘关节的力矩力传递性能越好; 在工作空间的极限位置时, 力矩传递性能最低; 力矩传递性能随着电机输入转动角度的增大而降低。

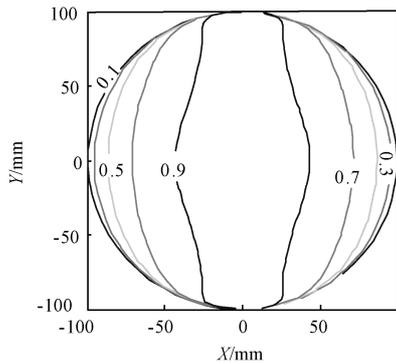


图 3 力矩传递性能评价指标 K_M 在工作空间内的分布
Fig.3 Distribution of the torque transitivity evaluation index K_M on workspace

当 2 个输入力矩之间的差值越大时, 肘关节的使用性能越不好。为了能够合理的判别肘关节力矩输入性能的优劣情况, 根据式 (20), 定义力矩输入均衡性能评价指标为

$$K_{MR} = \frac{\|M\|_{\max} - \|M\|_{\min}}{\|M\|_{\max}} \quad (22)$$

其中, K_{MR} 值为一无量纲值, 它表示输入力矩最大值与最小值之间的差值关系。当 K_{MR} 越小, 2 个输入力矩之间的变化幅度越小, 肘关节的使用性能越好, 运行越趋于稳定, 肘关节机构的使用寿命越长。

综合式 (11) ~ (22), 并借助 MATLAB 软件, 绘制了力矩输入均衡性能评价指标 K_{MR} 在工作空间内的分布图, 如图 4 所示。从图 4 中分析, 肘关节的力矩输入均衡性能也呈对称分布, 在初始位置附近, 约 50% 的工作空间内具有非常好的使用性能和运动稳定性。在肘关节达到工作空间的极限位置时, 运动稳定性越差, 肘关节的使用寿命越短。

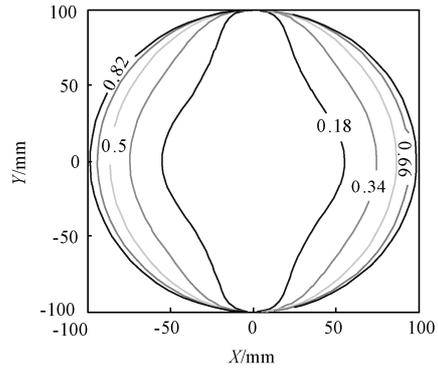


图 4 力矩输入均衡性能评价指标 K_{MR} 在工作空间内的分布
Fig.4 Distribution of the torque input stability evaluation index K_{MR} on the workspace

4 结论

1) 本文提出一种基于二自由度正交球面并联机构的农业机器人新型肘关节, 推导了肘关节的位置反解方程, 建立了肘关节的静力学传递方程。

2) 分析了肘关节在工作空间内的静力学传递性能, 力矩传递性能呈对称分布, 在初始位置时, 力矩传递性能最好, 在工作空间的极限位置时, 力传递性能最低; 力矩传递性能随着电机输入转动角度的增大而降低。

3) 分析了肘关节的力矩输入均衡性能, 力矩输入均衡性能呈对称分布, 说明肘关节在外载荷下, 受力均匀; 在初始位置附近, 约 50% 的工作空间内具有非常好的使用性能和运动稳定性。在达到工作空间的极限位置时, 运动稳定性越差, 肘关节的使用寿命越短。

综上所述, 农业机器人新型肘关节具有 2 个自由度, 工作空间大, 运动稳定。具有非常好的静力学特性, 可以应用在水果采摘机上, 增加水果采摘机使用寿命, 也可应用在农药喷雾机上, 增加喷撒范围, 提高作业效率。

[参 考 文 献]

[1] Edan Y, Miles G E. Design of an agricultural robot for harvest ing melons[J]. Trans of the ASAE, 1993, 36(2): 593-603.

[2] 赵匀, 武传宇, 胡旭东, 等. 农业机械人的研究进展及存在问题[J]. 农业工程学报, 2003, 14(1): 20-24. Zhao Yun, Wu Chuangyu, Hu Xudong, et al. Research progress and problems of agricultrual robot[J]. Transactions of the CSAE, 2003, 19(1): 20-24. (in Chinese with English abstract)

[3] Peng C, Yoshizo H, Mitushi Y. Grasping control of robot hand using fuzzy neural network[J]. Lecture Notes in Computer Science, 2006, 3972: 1178-1187.

[4] 郭伟斌, 陈勇, 侯学贵, 等. 除草机器人机械臂的逆向求解与控制[J]. 农业工程学报, 2009, 25(4): 108-112. Guo Weibin, Chen Yong, Hou Xuegui, et al. Inverse kinematics solving and motion control for a weeding robotic arm[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(4): 108-112. (in Chinese with English abstract)

- [5] 金振林, 曹舜, 高峰. 新型机器人肩关节及其运动学分析[J]. 中国机械工程, 2009, 20(14): 1639—1642.
Jin Zhenlin, Cao Shun, Gao Feng. Design and kinematics analysis of a novel robot shoulder joint[J]. China Mechanical Engineering, 2009, 20(14): 1639—1642. (in Chinese with English abstract)
- [6] 金振林, 高峰, 李研彪. 一种机器人肩关节[P]. 中国专利: 200710062552.5, 2008-08-08.
- [7] 孙立宁, 刘宇, 祝宇虹. 一种用于腕关节的球面三自由度并联解耦机构位置分析[J]. 中国机械工程, 2003, 14(10): 831—834.
Sun Lining, Liu Yu, Zhu Yuhong. A kinetic analysis of 3-DOF decoupled spherical parallel mechanism used for the wrist joint[J]. China Mechanical Engineering, 2003, 14(10): 831—834. (in Chinese with English abstract)
- [8] Sellaouti R. Design of a 3-DOF parallel actuated mechanism for a hip joint//Washington DC, Proc. ICRA 2002.
- [9] 金振林, 荣誉. 基于三分支非均匀分布球面并联机构的腰关节设计[J]. 中国机械工程, 2007, 18(22): 2697—2699.
Jin Zhenlin, Rong Yu. Design of a waist joint based on three branches unequal spaced distribution spherical parallel manipulator[J]. China Mechanical Engineering, 2007, 18(22): 2697—2699. (in Chinese with English abstract)
- [10] 金振林, 崔冰艳. 实现屈曲和旋转运动的机器人的肘关节[P]. 中国专利: 100544904, 2009-09-30.
- [11] Cui Bingyan, Jin Zhenlin. Analysis of workspace and rotation ability for a novel humanoid robot elbow joint[J]. Advanced Materials Research, v (69/70): 585—589.
- [12] Tsai L W. Robot Analysis: The Mechanics of Serial and Parallel Manipulators[M]. New York: John Wiley and Sons, 1999.
- [13] Gosselin C M. Stiffness mapping for parallel manipulators[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1990, 6(3): 377—382.
- [14] 杨启志, 马履中, 谢俊, 等. 三平移全柔性并联微动机器人机构静力学分析[J]. 农业工程学报, 2007, 38(11): 110—113.
Yang Qizhi, Ma Luzhong, Xie Jun, et al. Static forces analysis of the fully compliant three DOF translational parallel mechanism[J]. Transactions of the CSAM, 2007, 38(11): 110—113. (in Chinese with English abstract)
- [15] 李智国, 刘继展, 李萍萍. 机器人采摘中番茄力学特性与机械损伤的关系[J]. 农业工程学报, 2010, 26(5): 1—5.
Li Zhiguo, Liu Jizhan, Li Pingping. Relationship between mechanical property and damage of tomato during robot harvesting[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(5): 1—5. (in Chinese with English abstract)
- [16] 黄真, 赵永生, 赵铁石. 高等空间机构学[M]. 北京: 中国高等教育出版社, 2006. 192—195.
- [17] 刘俊卿. 理论力学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2008: 224—230.

Analysis of statics performance for a novel elbow joint of agricultural robot

Cui Bingyan^{1,2}, Jin Zhenlin^{1*}

(1. College of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China;

2. Ocean College, Hebei Agricultural University, Qinhuangdao 066003, China)

Abstract: For raising automation level of farm operation, improving popularity and adaptability of agricultural robot and advancing its service efficiency, a novel elbow joint of agricultural robot was proposed based on 2-D orthogonal spherical parallel mechanism. The architecture of the mechanism was comprised of a moving platform attached to a frame through two linkages, and the moving platform relative to the frame had two-rotation-freedom. Compared with the others robot elbow joint, the elbow joint had the advantage of structure symmetry, easy assembly, good kinematics character and large workspace. In this paper, the statics performance of the novel elbow joint of agricultural robot was analyzed. Firstly, the static transmission equation of the elbow joint was established by using the principle of virtual works. Further, the force Jacobian matrix was introduced into the statics performance evaluation index by using the norm in Matrix theory, and the torque input stability evaluation index as well as the torque transitivity evaluation index were defined, and the performance atlas of the statics performance evaluation indexes were plotted at the work spaces of the elbow joint. Results showed that the statics transitivity evaluation index and the torque input stability evaluation index of the novel elbow joint presented a symmetric distribution, and the statics transitivity decreased as the angle increasing, and had good static performance and motion stability at initial position nearby 50% range. Important information for optimization design in the novel elbow joint of agricultural robot was provided in this paper.

Key words: agricultural engineering, robots, static analysis, elbow joint, the torque performance evaluation index